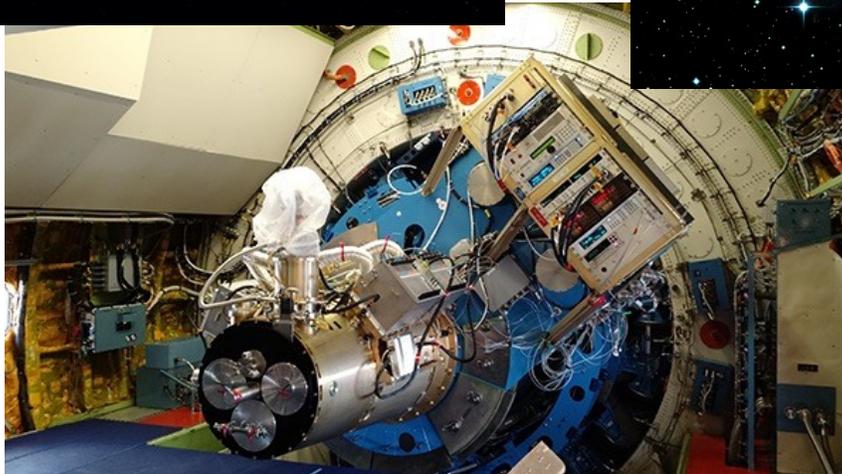
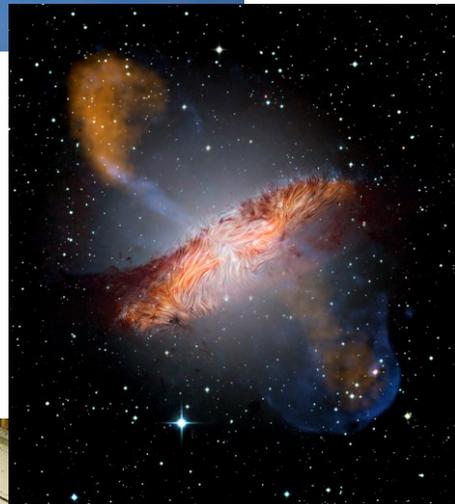
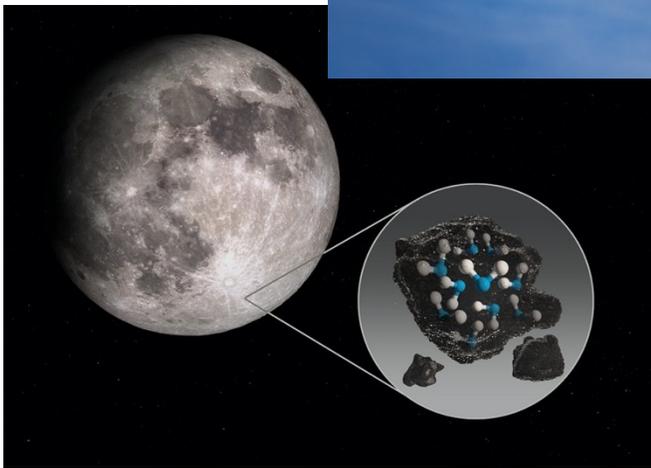


# Embajadores de Astronomía Aerotransportada de la NASA

## SOFIA Panorama Científico General SOFIA Estudio de Casos Científicos 4.ª Edición (2021)



## Tabla de Contenidos

<b>SOFIA. Panorama científico</b>	Pág. 2
<b>Glosario</b>	Pág. 7
<b>La ocultación de Plutón</b> <i>Persiguiendo la sombra de Plutón</i>	Pág. 11
<b>Primera luz con una captura de Júpiter</b> <i>Júpiter, un primer objetivo genial</i>	Pág. 17
<b>Nebulosa planetaria M2-9</b> <i>Cómo el universo produce los elementos</i>	Pág. 22
<b>Anillo circumnuclear de la Vía Láctea</b> <i>Anillo de polvo alrededor de un agujero negro</i>	Pág. 26
<b>Agua en el suelo lunar iluminado por el Sol</b> <i>Secretos escondidos a la luz de la Luna</i>	Pág. 31

Servicios de traducción proporcionados por Lourdes Cahuich Campos.

# SOFIA. Panorama científico

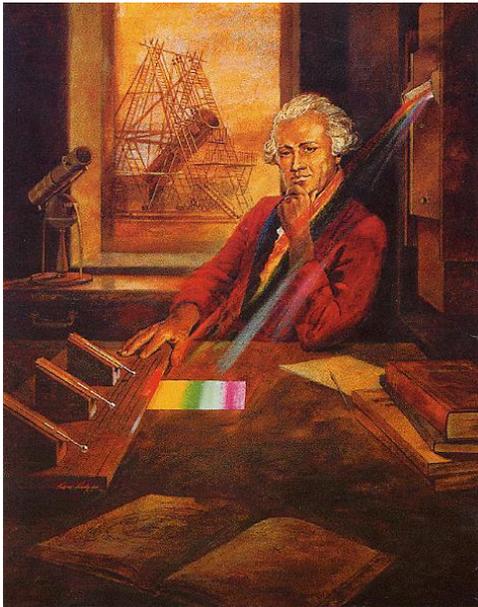
## I. Radiación electromagnética

### A. La luz visible

El ojo humano es sensible a la radiación electromagnética con longitudes de onda entre 400 y 750 nanómetros (frecuencias entre  $7.5 \times 10^{14}$  y  $4.0 \times 10^{14}$  Hertz). Este rango se conoce como luz visible.

### B. La luz infrarroja

La luz infrarroja tiene longitudes de onda más largas y frecuencias más bajas que la luz visible. Fue descubierta por William Herschel, en 1800, durante un experimento cuya intención era medir las fuerzas relativas de los diferentes colores de la luz solar (Figura 1). Los físicos y astrónomos consideran que la porción de infrarrojo del espectro electromagnético se extiende desde una longitud de onda de 0.75 **micrones** (750 nm, el límite rojo de la visión humana) hasta 300 micrones (8,300,000 nm).



**Figura 1:** Representación de Sir William Herschel descubriendo la luz infrarroja. (De *Foundations, Seeds & Backman*, © 2016 Cengage Learning).

El rango del infrarrojo, que es muy amplio, se divide convencionalmente en: **infrarrojo cercano** (NIR), desde 0.75 hasta 5 micrones, **infrarrojo medio** (MIR), desde 5 hasta 30 micrones, e **infrarrojo lejano** (FIR), desde 30 hasta 300 micrones. Los límites entre estos rangos son bastante arbitrarios porque corresponden a varias consideraciones prácticas. Por ejemplo, detectar la luz del NIR requiere técnicas parecidas a aquellas para luz visible, el rango MIR es

donde la radiación del fondo terrestre es más fuerte y el rango FIR es absolutamente no observable desde la superficie terrestre, debido al vapor de agua.

### C. La emisión de cuerpo opaco / La Ley de Wien

La radiación electromagnética se produce siempre que una partícula cargada, por ejemplo, un electrón, se acelera. La cantidad de energía determina la frecuencia (y, por lo tanto, su longitud de onda correspondiente) de la radiación producida.

Se conoce como **cuerpo opaco** a un tipo de objeto radiante idealizado que es completamente opaco y, por lo tanto, absorbe y emite todas las longitudes de onda de radiación con una eficiencia del 100%. Los radiadores de cuerpo opaco en realidad brillan, no son necesariamente negros en las longitudes de onda visibles.

La temperatura de un cuerpo opaco determina la velocidad de aceleración de las partículas dentro de él y, por consiguiente, el **espectro** (la intensidad como función de la frecuencia o longitud de onda) de la radiación que produce el cuerpo opaco. A través de experimentos de laboratorio y trabajo teórico se determinó que la máxima intensidad de la radiación de un cuerpo opaco se encuentra en la longitud de onda que es inversamente proporcional a la temperatura. Esta relación, que se refiere solamente a la emisión de cuerpo opaco, se conoce como **Ley de Wien**, en honor a Wilhelm Wien, el físico que primero la notó:

$$\lambda_{\text{máx.}} = 2.90 \times 10^6 \text{ nm K / T}$$

Por ejemplo, la superficie del Sol es casi un cuerpo opaco perfecto, con una temperatura de 5 780 K. Usando la Ley de Wien, se calcula que la emisión más fuerte del Sol está en una longitud de onda de 502 nanómetros.

## II. Astronomía

### A. El Sistema Solar / La Galaxia / El Universo

Existe un error común, fomentado hasta cierto punto por programas de televisión y películas de ciencia ficción, que es usar los términos **Sistema Solar**, **Galaxia** y **Universo** como si fueran sinónimos. Sin embargo, esto es como confundir el vecindario con el estado y con el continente.

El Sistema Solar está compuesto por el Sol y todos los objetos atraídos gravitatoriamente por el Sol, incluyendo a la Tierra, los **planetas** hermanos de la Tierra y satélites, **asteroides**, **cometas** y objetos del **Cinturón de Kuiper**. Se entiende que los asteroides, cometas y objetos del Cinturón de Kuiper son pequeños restos que quedaron de la formación de los planetas. La Unión Astronómica Internacional (UAI) define *planeta* como un objeto cuya masa es suficiente para que su gravedad le dé forma esférica y también control sobre su zona orbital, es decir, que puede anexar o expulsar todos los cuerpos pequeños en su vecindad. El resultado de la redefinición de *planeta* aprobada en 2006 ocasionó la reclasificación de Plutón, de planeta a **planeta enano** y lo mismo para Ceres que, de ser el asteroide más grande, ahora califica también como *planeta enano*. La zona planetaria del Sistema Solar, comprendida dentro del diámetro de la órbita de

Neptuno, es de 8 horas luz de distancia. El Sistema Solar es un ejemplo de un **sistema planetario**, de los cuales conocemos actualmente más de 5,000.

La **galaxia de la Vía Láctea**, en la que se encuentra nuestro sistema planetario, es una colección de, al menos, 100 mil millones de estrellas más un sinnúmero de planetas, satélites y otros objetos que los orbitan. En otras palabras, la Galaxia podría contener 100 mil millones de sistemas planetarios. La Galaxia también comprende al **medio interestelar (ISM**, por sus siglas en inglés), gas y polvo disperso o en forma de nubes entre las estrellas que, ahora sabemos, es la materia prima para la formación de nuevas estrellas y planetas. El prominente disco visible de la Galaxia tiene alrededor de 80,000 años luz de diámetro; hay evidencia de que el halo esférico de baja densidad de la Galaxia se extiende en un radio de 200,000 años luz o más. La Vía Láctea es una galaxia espiral, más grande que la mayoría de las galaxias, pero no es gigante.

El término *Universo* se refiere a todo lo que existe. Las observaciones humanas se extienden hasta un límite de casi 14 mil millones de años luz de distancia; han pasado aproximadamente 14 mil millones de años desde que aconteció el **Big Bang** (o la **Gran Explosión**). Dentro de ese límite, las muestras observacionales indican que existe un total aproximado de 1 billón ( $10^{12}$ ) de galaxias. El Universo observable podría ser solo una pequeña fracción del Universo completo, pero hasta ahora es todo lo que conocemos.

## **B. Los telescopios y los observatorios**

Los telescopios son la herramienta principal de la investigación astronómica. Todos los grandes observatorios usan **telescopios reflectores**, en los cuales el principal elemento óptico es un espejo. El diámetro del espejo primario del telescopio determina la capacidad para captar la luz (la capacidad de recolectar la luz que llega) y su **resolución angular** (la habilidad de distinguir detalles). Ambas características mejoran al aumentar el diámetro. La Figura 2 (panel izquierdo) muestra el Gemini Norte, telescopio de 8 metros de infrarrojo cercano y visual, en Hawái, y (panel derecho) el radiotelescopio de 100 metros, Green Bank, en Virginia Occidental. Actualmente, el telescopio más grande capaz de realizar observaciones en longitudes de onda visibles y en infrarrojo cercano es el Gran Telescopio Canarias (GTC), en las Islas Canarias, que tiene un diámetro de 10.4 metros. El radiotelescopio más grande es Tianyan, que tiene un disco de 500 metros y se encuentra en China.



**Figura 2:** (a) Telescopio de 8 metros de infrarrojo cercano y visual Gemini Norte. (b) Radiotelescopio de 100 metros Green Bank, en Virginia Occidental. (De *Foundations, Seeds & Backman*, © 2016 Cengage Learning).

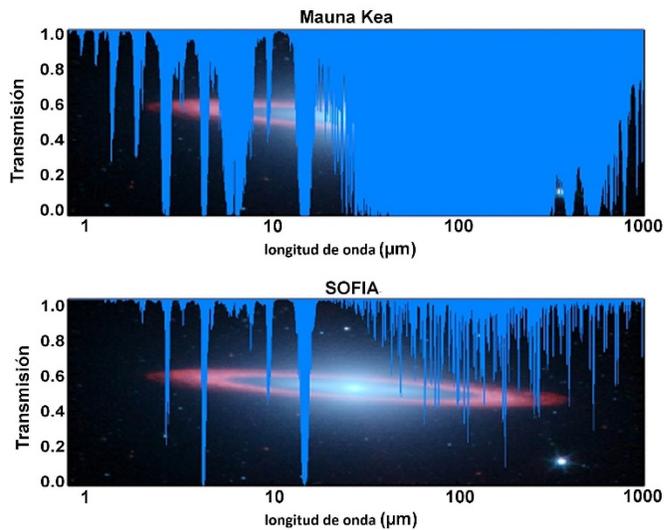
Los telescopios de investigación, por lo general, se ubican en las cimas de las montañas, por encima del clima nublado y las turbulencias de la atmósfera baja, lejos de las luces de las ciudades. Algunos telescopios se han lanzado al espacio para estar completamente por encima de la atmósfera; por ejemplo, el telescopio espacial Hubble, un telescopio de 2.5 metros de diámetro que trabaja con longitudes de onda del ultravioleta cercano, visual e infrarrojo cercano, y el telescopio Herschel, un telescopio de 3.5 metros de diámetro que trabaja con longitudes de onda de infrarrojo lejano. **SOFIA** tiene un telescopio reflector de 2.5 metros de diámetro.

### C. La atmósfera de la Tierra

La atmósfera de la Tierra no es completamente transparente a toda la radiación electromagnética que proviene del espacio. El agua, el dióxido de carbono y las moléculas de ozono evitan que algunas longitudes de onda lleguen incluso a las cimas de las montañas más altas. Todo el rango del infrarrojo lejano, las longitudes de onda desde 30 a 300 micrones, es bloqueado por completo, incluso en un lugar tan alto y seco como la cumbre de Mauna Kea, en Hawái. Los astrónomos que desean realizar observaciones en infrarrojo lejano necesitan que, de alguna forma, sus telescopios se encuentren por encima de la capa de vapor de agua de la atmósfera. Los observatorios espaciales, por supuesto, se encuentran completamente por encima de la atmósfera, pero también son demasiado caros.

El astrónomo Gerard Kuiper, quien ayudó a convertir Mauna Kea en un observatorio, sugirió que se podría obtener lo mejor de ambos mundos —una buena recepción infrarroja, pero con un costo relativamente modesto— con un observatorio aerotransportado. Las siguientes son dos gráficas (Figura 3) que comparan la transmisión (transparencia) de la atmósfera (1.0 = completamente transparente) desde Mauna Kea, a una altitud de 14,000 pies (aprox. 4.2 kilómetros) frente a **SOFIA**, volando a 43,000 pies (aprox. 13 kilómetros). Observe que, en el panel inferior de la Figura 3, la transmisión a través del rango de la longitud de onda del

infrarrojo lejano es menor a 100% y es variable, aún desde el punto de vista de SOFIA, pero promedia aproximadamente 80%.



**Figura 3:** Comparación entre la transmisión atmosférica de la Tierra con respecto a la longitud de onda, a 14,000 pies (aprox. 4.2 kilómetros) y a 43,000 pies (aprox. 13 kilómetros) por arriba del nivel del mar.

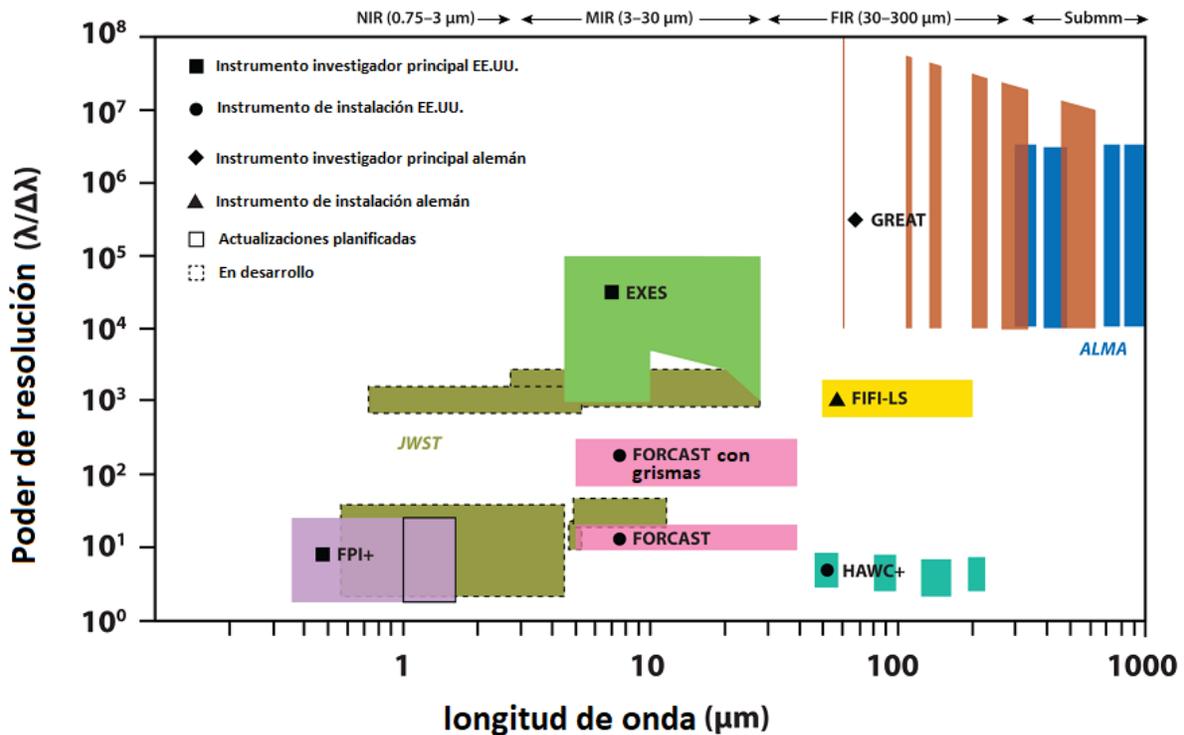
#### D. La astronomía infrarroja

Las principales categorías de los objetos que son de interés para los observatorios infrarrojos se definen por las propiedades de la radiación infrarroja:

- (1) Objetos de baja temperatura: El rango infrarrojo de las longitudes de onda que van de los 0.75 hasta los 300 micrones, corresponde (según la Ley de Wien) a temperaturas desde alrededor de 300 K (por ejemplo, los objetos como estrellas enanas rojas frías y gigantes rojas que radian con fuerza en las longitudes de onda del infrarrojo cercano) hasta 10 K, aproximadamente, (objetos como núcleos densos de nubes del ISM, que radian mayormente en longitudes de onda de infrarrojo lejano).
- (2) Objetos dentro o detrás de nubes interestelares: El polvo del ISM bloquea con fuerza la luz UV y visible, pero permite pasar la luz infrarroja con relativa facilidad, más aún para la longitud de onda más larga.
- (3) Moléculas grandes: Las moléculas como las que forman los compuestos orgánicos, tienen características espectrales con tendencia a las longitudes infrarrojas, correspondientes a la emisión de energía cinética de baja energía.

## E. Los instrumentos científicos de SOFIA

# Los instrumentos de SOFIA



**Figura 4:** Resolución espectral frente a las “huellas” de longitud de onda de los instrumentos científicos de SOFIA, comparados con el telescopio espacial James Webb (JWST; en verde oliva) y el complejo de radiotelescopios Gran Conjunto Milimétrico de Atacama (ALMA por sus siglas en inglés), en Chile.

Considerados en conjunto, los instrumentos de SOFIA son capaces de analizar la luz con longitudes de onda que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano. Los instrumentos astronómicos se ubican en tres categorías principales: (1) los **fotómetros**, los cuales miden el brillo de los objetos, (2) los **generadores de imágenes**, los cuales toman fotografías y (3) los **espectrómetros**, los cuales separan la luz en el espectro de colores que la componen. La cámara guía FPI+ puede usarse como un fotómetro; FLITECAM, FORCAST y HAWC+ son generadores de imágenes; EXES, FIFI-LS y GREAT son espectrómetros. Algunos instrumentos de SOFIA combinan dos categorías, por ejemplo, FLITECAM y FIRCAST tienen una selección de prismas de rejillas (**grismas**, por su acrónimo en inglés) que les dan la habilidad de producir espectros de los objetos fotografiados. FIFI-LS también realiza lo mismo: captura en una imagen series de longitudes de onda de banda angosta, muy específicas. Ese instrumento se conoce como espectrómetro de imagen de campo.

Todos los instrumentos de SOFIA, a excepción del GREAT, detectan radiación con base en el aspecto de la partícula de luz, es decir, convierte un solo paquete de luz (fotón) en señal eléctrica y luego mide esa señal. El espectrómetro GREAT es esencialmente un receptor de radio que se basa en el aspecto de la onda de luz, ya que detecta y mide la fuerza de la radiación electromagnética entrante.

En el eje vertical de la Figura 4, la resolución espectral indica el ancho del detalle espectral más pequeño que puede ser detectado por cada instrumento. Por ejemplo, FLITECAM con una grisma añadida, tiene una resolución de  $10^3$ , lo que significa que cuando se observa en una longitud de onda de 5 micrones (5 000 nm) puede detectar la línea espectral de tan solo 0.005 micrones (5nm) de ancho.

## Glosario

**agujero negro:** Región del espacio en la que la gravedad es tan fuerte que la velocidad de escape es mayor que la velocidad de la luz, por lo que ésta no puede escapar. Un agujero negro se forma por la muerte y colapso de una estrella masiva.

**anillo circumnuclear (CNR, por sus siglas en inglés):** Un anillo o toroide de gas y polvo, con un radio de 5 años luz, que rodea el núcleo de la galaxia de la Vía Láctea.

**año luz:** Unidad de longitud igual a la distancia que recorre la luz en un año; aproximadamente  $6 \times 10^{12}$  millas o casi 10 billones de kilómetros.

**asteroide:** Pequeño objeto metálico o rocoso que orbita alrededor del Sol; se entiende que los asteroides son cuerpos residuales de la formación de los planetas interiores.

**(el) Big Bang o la Gran Explosión:** Evento en el que el Universo comenzó a existir, hace 14 mil millones de años. (*el Gran Destello o la Gran Expansión* serían más adecuados).

**color representativo (también conocido como *color falso*):** Código de colores para representar datos o propiedades de un objeto, que es diferente del color del objeto en longitud de onda visual.

**Cinturón de Kuiper:** Colección de cuerpos pequeños que orbitan alrededor del Sol, más allá de la órbita de Neptuno. Plutón fue el primer objeto descubierto del Cinturón de Kuiper. A inicios de 1992, se descubrieron otros cuerpos orbitando la zona.

**cometa:** Pequeño objeto helado que orbita alrededor del Sol, que se entiende que es parte del escombros de la formación de los planetas exteriores.

**criostato:** Contenedor para materiales extremadamente fríos, como nitrógeno o helio líquidos. Las cámaras infrarrojas se introducen en los criostatos para operar, típicamente, a temperaturas cercanas al cero absoluto.

**cuerpo opaco:** Un tipo idealizado de objeto radiante que es completamente opaco, de modo que absorbe y emite perfectamente radiación en todas las longitudes de onda.

**cúmulo globular:** Conjunto denso y esférico que contiene 100,000 estrellas o más. Existen 150 o más cúmulos globulares que son satélites de la Galaxia.

**curva de luz:** Gráfica del brillo con respecto al tiempo de un objeto variable, como el ocultamiento de una estrella.

**difracción:** Imagen borrosa causada por la propagación de ondas de luz que han encontrado a su paso un borde o una apertura restringida.

**disco de acreción:** Un disco de material que gira en torno a una masa central como una estrella, una protoestrella o un agujero negro.

**efecto Doppler:** Es la alteración (aparente o real) de las longitudes de onda a causa del movimiento relativo. Si la distancia entre un emisor y un receptor se acorta, la percepción es que la longitud de onda también se comprime, se acorta; y si la distancia entre ambos se extiende, la longitud de onda también se hará o se percibirá más larga.

**enana blanca:** Un objeto estelar caliente, pequeño y denso, remanente de la muerte de una estrella con una masa aproximada a la del Sol.

**espectrómetro (espectrógrafo):** Instrumento científico que mide la intensidad de la luz en un espectro como función de la longitud de onda o frecuencia. Algunos espectrómetros contienen un detector sensor de imagen (una cámara de matriz).

**espectro:** Un despliegue de luz separado en los colores que lo componen, o un gráfico de dicho despliegue que muestra la intensidad de la luz con respecto a la longitud de onda o la frecuencia.

**fotómetro:** Instrumento científico que mide con precisión la cantidad de luz procedente de un objeto de interés. Algunos fotómetros contienen un detector sensor de imagen (una cámara de matriz).

**galaxia:** Un gran conjunto de estrellas y material interestelar unido gravitacionalmente. Vivimos en la galaxia de la Vía Láctea.

**Galaxia o Vía Láctea:** La galaxia donde se encuentra el Sistema Solar; una galaxia espiral con un disco visible de aproximadamente 120,000 años luz de diámetro y que contiene más de 100 mil millones de estrellas más sus respectivos planetas.

**sensor de imagen (*imager*, en inglés):** Un instrumento que consta de una cámara digital con una matriz de píxeles (elementos de la imagen).

**grisma:** Una *rejilla prismática*, dispositivo óptico que puede instalarse dentro de un sensor de imagen para transformarlo en un espectrógrafo de imágenes.

**infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés):** Longitudes de onda entre 0.75 y 3 micrones.

**infrarrojo lejano (FIR, por sus siglas en inglés):** Longitudes de onda desde los 30 hasta los 300 micrones.

**infrarrojo medio (MIR, por sus siglas en inglés):** Longitudes de onda entre 3 y 30 micrones.

**Kelvin (K):** Escala de temperatura con base en grados Celsius y punto cero en el cero absoluto,  $-273^{\circ}\text{C}$  ( $-460^{\circ}\text{F}$ ).

**Ley de Wien:** La relación matemática entre la temperatura de un cuerpo opaco y la longitud de onda en la que su emisión es más intensa.

**línea espectral:** Rasgo en un espectro causada por absorción o emisión de luz por un tipo específico de átomo o molécula.

**mare** (*plural maria*) (palabra latina para “mar”): Región grande y oscura de la superficie lunar, que fue creada por antiguos flujos de lava.

**medio interestelar (ISM, por sus siglas en inglés):** El gas y polvo entre las estrellas.

**micrón:** Unidad de longitud igual a  $10^{-6}$  metros o 1 000 nanómetros.

**nebulosa:** Nube en el espacio, generalmente compuesta por una mezcla de gas y polvo.

**nebulosa planetaria:** Cascarones de gas expulsados durante la muerte de una estrella de masa similar a la del Sol. No tienen ninguna relación con los planetas salvo que algunas pueden confundirse con uno al observarse por el telescopio.

**nucleosíntesis:** Producción de elementos químicos por reacciones de fusión nuclear dentro de estrellas, en el estallido de las supernovas y en las colisiones de alta energía.

**Observatorio Aerotransportado de Kuiper (KAO, por sus siglas en inglés):** Observatorio aerotransportado de la NASA de 1975 hasta 1995. Predecesor de SOFIA. Cargaba un telescopio de 0.9 metros (36 pulgadas).

**ocultación:** Es el bloqueo de un cuerpo celeste por otro, en primer plano, que es más grande en tamaño aparente.

**pixel:** La unidad de color más pequeña que compone una imagen digital.

**planeta:** Un objeto que orbita alrededor del Sol lo suficientemente masivo como para que la gravedad lo haya contraído a una forma esférica y también lo suficientemente masivo como para haber limpiado su zona orbital de otros objetos.

**planeta enano:** Un objeto que orbita alrededor del Sol lo suficientemente masivo como para que la gravedad lo haya contraído a una forma esférica, pero no lo suficientemente masivo como para despejar su zona orbital de otros objetos. Plutón (en el cinturón de Kuiper) y Ceres (en el cinturón de asteroides) son ejemplos de planetas enanos.

**planeta extrasolar (o exoplaneta):** Un planeta que orbita alrededor de una estrella diferente al Sol.

**resolución angular:** Medida del detalle espacial más pequeño (medido en unidades angulares) que se pueda distinguir por un telescopio o un sensor de imagen.

**resolución espectral:** Medida del detalle más pequeño en un espectro que se pueda distinguir con un espectrómetro.

**remanente de supernova:** Nube en expansión de gas y polvo producida por una supernova.

**revisión por pares:** El protocolo mediante el cual expertos evalúan un artículo científico, por lo general, de forma anónima y revisado en consecuencia, antes de su publicación.

**Sagittarius A\* (Sgr A\*):** Fuente de emisión puntual de rayos X y radio en el centro mismo de la Vía Láctea, entendida como el disco de acreción alrededor de un agujero negro supermasivo.

**sistema planetario:** Un grupo de planetas en órbita alrededor de una estrella. El Sistema Solar es un ejemplo de un sistema planetario. Hasta la fecha se han descubierto más de 4,000 sistemas planetarios.

**Sistema Solar:** El Sol y todos los objetos unidos gravitacionalmente al Sol, incluidos la Tierra, los planetas hermanos de la Tierra más sus satélites, asteroides, cometas y objetos del cinturón de Kuiper.

**SOFIA:** El Observatorio Estratosférico de Astronomía Infrarroja (por sus siglas en inglés) es una instalación científica conjunta de EE. UU. y Alemania, compuesta por un avión Boeing 747SP modificado que lleva un telescopio reflector con un diámetro efectivo de 2,5 metros (100 pulgadas).

**supernova:** Destrucción explosiva y ultra luminosa de una estrella masiva.

**telescopio reflector:** Un telescopio con un espejo como su principal elemento óptico. SOFIA lleva un telescopio reflector.

**Universo:** Todo lo que existe. Se estima que el Universo observable, que puede ser sólo una pequeña fracción de todo el Universo, contiene un total aproximado de 2 billones ( $2 \times 10^{12}$ ) de galaxias.

**volátiles:** Sustancias que se evaporan con relativa facilidad; por ejemplo, el agua.

## SOFIA. Estudio de caso científico:

### La ocultación de Plutón

#### *Persiguiendo la sombra de Plutón*

Antes de leer, revise los siguientes términos clave (Glosario, páginas 7-10):

Cinturón de Kuiper, curva de luz, difracción, planeta enano, ocultación.

**Antecedentes:** Plutón fue descubierto en 1930 y llegó a ser conocido como el noveno **planeta** en nuestro **Sistema Solar**. Sin embargo, la etiqueta de Plutón como planeta fue cuestionada más tarde. El Observatorio Lowell en Flagstaff, Arizona, contrató al astrónomo aficionado Clyde Tombaugh para observar una sección particular del cielo en busca de un nuevo planeta. Tombaugh estaba utilizando cálculos que apuntaban a la ubicación de un objeto que se pensaba podía perturbar el movimiento de Neptuno. Tombaugh encontró a Plutón, pero las mediciones de las desviaciones de Neptuno se determinaron como incorrectas más adelante. La órbita de Neptuno en realidad no es influenciada por una masa grande desconocida en el Sistema Solar exterior. Por lo tanto, el descubrimiento de Plutón resulta haber sido mera casualidad.

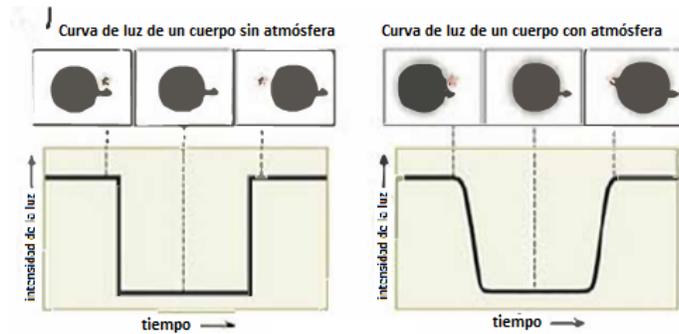
Durante más de 60 años, Plutón fue memorizado por muchos estudiantes como un planeta más del Sistema Solar; cuando las nuevas tecnologías mejoraron las observaciones astronómicas, aparecieron más objetos orbitando en la misma zona que Plutón. De hecho, hay un cinturón entero de objetos pequeños más allá de Neptuno, similar al cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter. Ambos cinturones están conformados por cuerpos residuales de la formación de los planetas. El cinturón externo se llama cinturón de Kuiper, en honor a Gerard Kuiper, uno de los astrónomos que predijeron su existencia.

A principios del siglo XXI ya se habían encontrado cientos de objetos en el cinturón de Kuiper, algunos de ellos casi tan grandes como Plutón. En un encuentro internacional en 2006, los astrónomos asistentes decidieron redefinir el término *planeta*, y Plutón quedó clasificado en una nueva categoría como **planeta enano**. Un planeta enano es lo suficientemente masivo como para que su gravedad lo comprima y otorgue una forma esférica, pero no es lo suficientemente masivo como para despejar su zona orbital. En contraste, la Tierra y los otros planetas principales tienen atracciones gravitatorias lo suficientemente fuertes como para atrapar o arrojar hacia afuera cualquier objeto en una órbita cercana.

Estudiar un objeto tan pequeño y lejano como Plutón no es fácil. Una forma especialmente eficaz es esperar a que Plutón pase frente a una estrella. Cuando Plutón (o cualquier otro objeto del Sistema Solar) pasa frente a una estrella, bloquea la luz de esa estrella. A esto se le llama **ocultación**, y algunas de las propiedades del objeto en primer plano pueden determinarse por los detalles de cómo oculta (bloquea) a la estrella detrás. Por ejemplo, los anillos de Urano se descubrieron durante las observaciones de una ocultación estelar realizadas por el predecesor de **SOFIA**, el **Observatorio Aerotransportado de Kuiper (KAO)**, en 1984.

Otra medición importante que es posible realizar gracias al registro de una ocultación, es la detección de una atmósfera: una **curva de luz** de ocultación (gráfica de brillo con respecto al tiempo) producida por un objeto del Sistema Solar con atmósfera, difiere notablemente de la

producida por un objeto sin atmósfera (Figura 1). Un evento en el que la luz de una estrella de fondo se cubre gradualmente y luego reaparece gradualmente (Figura 1, panel derecho) muestra que el objeto en primer plano tiene "bordes difusos", es decir, una atmósfera. Las observaciones del KAO en 1988 confirmaron una medición terrestre anterior que indicaba que Plutón tiene atmósfera.

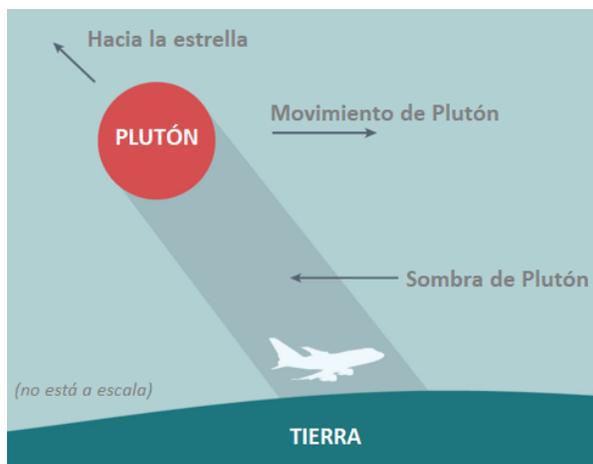


**Figura 1:** Curvas de luz que muestran la diferencia entre una ocultación estelar por un cuerpo sin atmósfera (izquierda) y uno con atmósfera (derecha). La curva de luz de un objeto con atmósfera tiene pendientes menos pronunciadas, debido a que la luz de la estrella de fondo es cortada y después se recupera más o menos gradualmente. El cuerpo que tiene una atmósfera tiene, en efecto, un

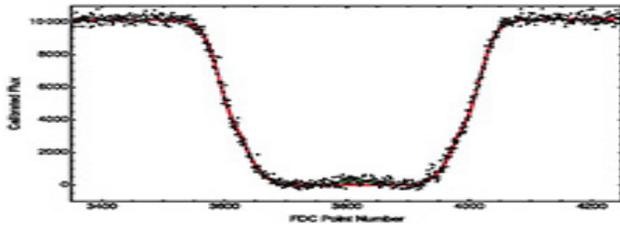
borde más “difuso”. (Crédito de la imagen: *Astronomy Magazine*/Roan Kelly)

**Investigación previa:** En 2011, a Michael Person del MIT y Ted Dunham del Observatorio Lowell se les concedió tiempo en SOFIA para observar la ocultación de una estrella por Plutón.

La movilidad de SOFIA permitió a los investigadores alcanzar una posición cercana al centro de la trayectoria de la sombra de la ocultación sobre el Pacífico oriental. (Figura 2). El equipo de Person quería observar especialmente el *destello central*, un pequeño incremento en el brillo, que dura solo unos segundos, a la mitad de la ocultación. Durante el destello central, la estrella de fondo ilumina toda la atmósfera de Plutón como un anillo brillante. Las características detalladas del destello central proporcionan información sobre la estructura de la atmósfera de Plutón. Por ejemplo, las capas de neblina que se encuentran más en un lado de Plutón que en otro, harían que el destello central no fuera simétrico. El equipo de Person pudo obtener buena información sobre la ocultación de 2011 y detectó un destello central débil (Figura 3).



**Figura 2:** Diagrama que muestra la relación entre la Tierra, el observatorio aerotransportado, Plutón y la estrella de fondo, durante la observación de la ocultación estelar. (Nota: los objetos en la figura no están a escala).



**Figura 3:** Curva de luz de la ocultación estelar de 2011, que muestra un destello central débil. (El destello central es un ligero y breve incremento de luz, a la mitad de la curva de luz).

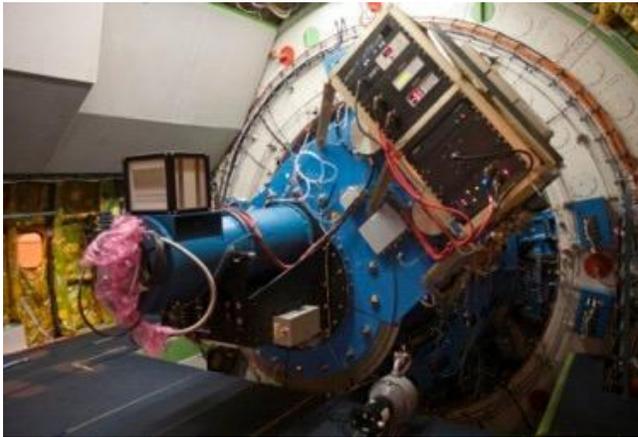
**El objetivo:** Los astrónomos calcularon que el 29 de junio de 2015, Plutón ocultaría una estrella relativamente brillante. Se predijo que la trayectoria de la sombra de Plutón, en 2015, cruzaría el Pacífico suroeste cerca de Nueva Zelandia (Figura 4). Convenientemente, SOFIA ya estaría en Nueva Zelandia en ese momento, como parte de la visita anual regular del observatorio al hemisferio sur. Por lo tanto, SOFIA sería el único gran observatorio que podría estar en el lugar correcto en el momento adecuado, para recopilar datos de la ocultación. En otra afortunada coincidencia, el evento de ocultación de 2015 ocurriría menos de tres semanas antes de que la sonda espacial New Horizons de la NASA se encontrara con Plutón. Esto permitiría a SOFIA observar las propiedades generales de la atmósfera de Plutón para proporcionar un contexto para las posteriores mediciones detalladas de New Horizons.



**Figura 4:** El seguimiento previsto sobre la Tierra de la sombra de ocultación estelar de Plutón en 2015. La línea continua central que cruza Nueva Zelandia muestra la trayectoria del centro de la sombra. Las dos líneas sólidas exteriores muestran los bordes de la sombra de Plutón. Tenga en cuenta que el diámetro de Plutón es aproximadamente del mismo tamaño que el de Australia. La línea punteada al norte muestra el límite de incertidumbre de la posición de la trayectoria de sombra, meses antes de la fecha de la ocultación.

**Instrumentos seleccionados:** Amanda Bosh, alumna de Michael Person en el doctorado del MIT, propuso hacer un seguimiento de las mediciones de ocultación de Plutón de 2011 con un vuelo de SOFIA para observar el evento de 2015. Amanda decidió utilizar una combinación de los instrumentos HIPO y FLITECAM (Figura 5). Los instrumentos científicos de un observatorio son dispositivos como **fotómetros**, **generadores de imágenes** (cámaras) y **espectrógrafos** que se conectan al telescopio y analizan la luz que recoge. HIPO es un fotómetro y FLITECAM

combina un sensor de imagen y un espectrógrafo. (Para obtener más información sobre los instrumentos de SOFIA, consulte la sección II.E).



**Figura 5:** Los instrumentos FLITECAM e HIPO están montados juntos en el telescopio SOFIA. El FLITECAM es el cilindro azul y el HIPO es la caja negra que está debajo.

FLITECAM e HIPO son los únicos dos instrumentos que pueden montarse juntos sobre el telescopio SOFIA, una disposición que aumenta el rango de longitudes de onda que pueden observarse. Esto es importante porque el efecto de los gases atmosféricos en la luz varía con la longitud de onda. De este modo, observar una ocultación en varias longitudes de onda proporciona más información sobre la composición y la densidad atmosférica del objeto en primer plano.

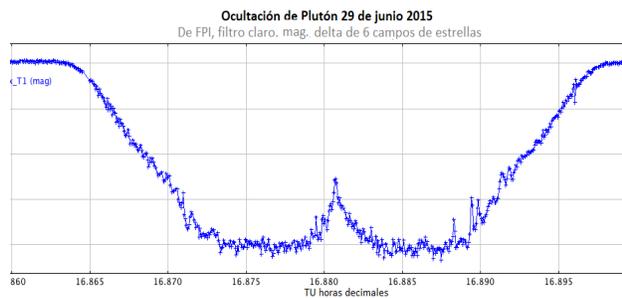
El instrumento de SOFIA que detecta las longitudes de **onda más cortas** es HIPO, seguida por FLITECAM, que detecta la siguiente banda más corta de longitud de onda. Debido al efecto óptico llamado **difracción**, las mediciones en longitudes de onda cortas proporcionan las imágenes y las curvas de luz más nítidas y detalladas. Por esta razón, la elección de combinar HIPO y FLITECAM en SOFIA para las observaciones de ocultación de Plutón, le dio al equipo de Amanda la mejor oportunidad de medir los detalles de las propiedades y la estructura atmosférica de Plutón.

**Los resultados y su interpretación:** El 30 de junio de 2015, SOFIA despegó de su base en Christchurch, Nueva Zelanda. A bordo se encontraban Amanda, Michael y algunos de sus colegas, listos para observar la ocultación estelar de Plutón.

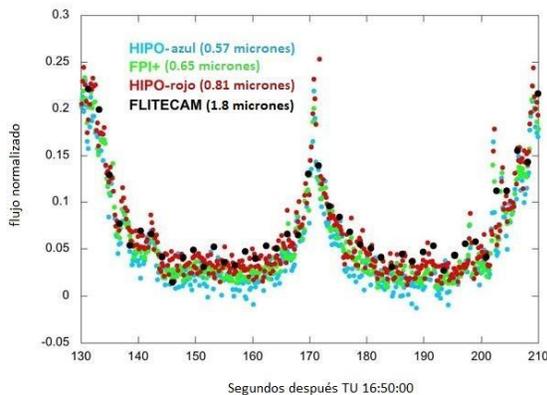
Hubo mucho suspenso porque, para observar el importante destello central, SOFIA tenía que ubicarse dentro de los 100 kilómetros (60 millas) del centro de la sombra de Plutón. Pero la posición de la trayectoria de la sombra no se conocía con precisión. Por lo tanto, se necesitaban ajustes de última hora en la trayectoria de vuelo de SOFIA, con base en las mediciones más recientes de la posición de Plutón en el cielo. Después del despegue de SOFIA, otros compañeros de equipo tomaron imágenes de Plutón y la estrella que iba a ocultar con un telescopio en Arizona. Esas imágenes se transmitieron a más compañeros de equipo en el MIT, quienes utilizaron esos datos para calcular nuevamente por dónde cruzaría la Tierra la sombra de Plutón. El grupo del MIT envió esa información por teléfono satelital a Amanda y Michael en SOFIA.

Amanda y Michael pudieron analizar estos datos mientras aún estaban volando SOFIA. Utilizaron un software especial para medir el brillo de Plutón más la estrella que estaba ocultando, para producir una curva de luz (Figura 6).

El equipo de Amanda comparó la curva de luz de 2015 con las observaciones realizadas en 2011 (consulte la Figura 3). Las pendientes inicial y final de la curva de luz de 2015 (Figuras 6 y 7) fueron más graduales que en 2011 y el pico central de 2015 fue más fuerte. Además, las pendientes de las curvas de luz de longitud de onda corta eran más pronunciadas que las de las longitudes de onda más largas. La interpretación de Amanda y Mike de estas observaciones fue que Plutón tenía una atmósfera más densa en 2015 que en 2011, con una capa de neblina perceptible. Eso es sorprendente porque Plutón estaba más lejos del Sol en 2015. Plutón debería ser más frío al aumentar su distancia al Sol. A medida que el planeta enano se enfriara, los gases atmosféricos deberían congelarse hasta convertirse en nieve y hielo en la superficie del planeta enano. Por lo tanto, los científicos esperaban que la atmósfera fuera más delgada en 2015 que en 2011, no más densa.



**Figura 6:** Curva de luz de la ocultación estelar de Plutón de 2015, que muestra los efectos de la atmósfera de Plutón, incluido un fuerte destello central. La duración total de la ocultación es de un poco menos de 2 minutos. Estos datos provienen de la cámara FPI+ que utiliza un filtro que pasa la mayor parte de la parte roja de la banda de longitud de onda visual.



**Figura 7:** Combinación de cuatro curvas de luz de la ocultación de Plutón de 2015, medidas a través de filtros centrados en longitudes de onda de 0.57, 0.65, 0.81 y 1.8 micrones. La curva de luz visual (0.57 micrones, puntos azules) tiene una pendiente más pronunciada que la curva de luz del infrarrojo cercano (1.8 micrones, puntos negros) al principio y al final de la ocultación. Esto es evidencia de una neblina que dispersa y bloquea la luz visual más que la luz infrarroja.

Unas semanas después del vuelo SOFIA, la sonda espacial New Horizons observó a Plutón y envió imágenes que mostraban que Plutón está geológicamente activo. La atmósfera de Plutón puede mantenerse y regenerarse gracias a la aportación ocasional de gases volcánicos, provenientes del interior del planeta enano. Las observaciones de SOFIA apoyaron estos

resultados de New Horizons, porque muestran que la atmósfera de Plutón varió en densidad en solo unos pocos años.

**Recursos adicionales:**

Artículo de revista sobre el vuelo de observación de la ocultación de Plutón 2015 de SOFIA (en inglés):

<http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/sofia-dashes-into-plutos-shadow-07032015/>

Video sobre el vuelo de 2015:

<https://www.youtube.com/watch?v=jzXsg8Fnags>

## **SOFIA. Estudio de caso científico:**

### **Primera luz con una captura de Júpiter**

#### ***Júpiter, un primer objetivo genial***

**Antes de leer, revise los siguientes términos clave (Glosario, páginas 7-10):** color representativo, cuerpo opaco, sensor de imagen, Ley de Wien, pixel.

**Antecedentes:** El vapor de agua en la atmósfera terrestre bloquea la mayor parte de la luz infrarroja antes de que esta llegue al suelo. Los astrónomos que quieren hacer observaciones en infrarrojo tienen que colocar sus telescopios, de alguna manera, por encima del vapor de agua de la atmósfera. Las ubicaciones en montañas, como Mauna Kea, en Hawái, pueden mejorar la observación infrarroja; sin embargo, parte de la luz infrarroja no puede ser detectada aún en la cima de las montañas. Por otra parte, los observatorios espaciales están completamente por encima de la atmósfera, pero son extremadamente caros. (Lea SOFIA. Panorama Científico, sección II.C, para mayor información sobre la atmósfera de la Tierra y la luz infrarroja).

El astrónomo Gerard Kuiper, quien ayudó a convertir Mauna Kea en un observatorio, sugirió que podría obtenerse lo mejor de ambos mundos —una buena recepción infrarroja, pero con un costo relativamente modesto— con un observatorio aerotransportado. **SOFIA** es el más nuevo de una serie de telescopios infrarrojos de la NASA alojados en aviones, capaces de operar por encima de casi todo el vapor de agua atmosférico. El telescopio SOFIA está a bordo de un avión Boeing 747 y puede operar a altitudes desde 37,000 pies (aprox. 11.2 kilómetros) hasta 45,000 pies (aprox. 13.7 kilómetros).

**El objetivo:** A principios de 2010, el programa SOFIA se estaba preparando para el primer vuelo científico del observatorio. Los astrónomos se refieren a las observaciones inaugurales de un telescopio como su *primera luz*. Los científicos de SOFIA necesitaban decidir qué objeto sería el más apropiado para observar en esa ocasión especial.

La científica del proyecto SOFIA, Pam Marcum, y el director de educación y divulgación pública, Dana Backman, propusieron que el primer objetivo celeste del observatorio debería ser el planeta Júpiter por tres razones: (1) Júpiter estaría alto en el cielo nocturno durante la primavera de 2010 y, por lo tanto, sería fácil de observar. (2) Júpiter es extremadamente brillante, tanto en longitudes de onda visuales como infrarrojas. (3) Los datos recopilados, incluso a partir de observaciones de prueba breves, podrían proporcionar resultados científicamente interesantes. El personal científico de SOFIA estuvo de acuerdo, así que se decidió que fuera Júpiter.

**La investigación previa:** Cuando se estudian planetas gigantes gaseosos como Júpiter, en longitudes de onda visibles, estamos limitados a ver solo luz reflejada desde la parte superior de las nubes de la atmósfera. Sin embargo, esas nubes son parcialmente transparentes a la radiación infrarroja; por lo tanto, SOFIA puede ver a través de las capas superiores de nubes, hacia las capas más profundas de la atmósfera del planeta.

Las observaciones infrarrojas de Júpiter en la década de 1960, desde el primer observatorio aéreo de la NASA, el Lear Jet, revelaron que el planeta emite aproximadamente el doble de la energía que recibe del Sol. Con base en esas observaciones, los astrónomos produjeron modelos matemáticos del interior del planeta. Los modelos indicaron que el calor que fluye de Júpiter es energía que quedó atrapada en el interior cuando el planeta se formó. Los modelos también predijeron que la mayor parte de la radiación infrarroja de Júpiter debería salir por igual desde todos los lugares del planeta. Los investigadores querían probar los modelos del interior de Júpiter haciendo imágenes infrarrojas más detalladas del planeta.

**Los instrumentos seleccionados:** Cada objeto produce una variedad de radiación electromagnética. La longitud de onda de la emisión más fuerte de un objeto opaco brillante (denominado **cuerpo opaco**) como Júpiter, está determinada por la temperatura del objeto. La relación entre la temperatura y la longitud de onda de salida más intensa de un cuerpo opaco se llama Ley de Wien. De acuerdo con la Ley de Wien, la temperatura de Júpiter de 152 **Kelvin** (152 K) significa que el planeta emite radiación con mayor intensidad en longitudes de onda en el rango de 25 a 40 **micrones**. Esas longitudes de onda están en el límite entre los rangos del **infrarrojo medio** y el **infrarrojo lejano**.

Los instrumentos científicos de SOFIA son dispositivos que se adhieren al telescopio y convierten la radiación infrarroja de fuentes celestes en señales eléctricas. Esas señales se manipulan y almacenan fácilmente como datos digitalizados (numéricos). Este es básicamente el mismo proceso que se realiza en el interior de una cámara digital normal.

El **sensor de imagen** en infrarrojo medio FORCAST (Figura 1) ya había sido elegido como el instrumento para la primera luz de SOFIA, porque fue uno de los primeros instrumentos de SOFIA listos para volar. Además, como sensor de imagen, es más sencillo y fácil de utilizar que otro tipo de instrumentos. Finalmente, FORCAST está diseñado para detectar luz infrarroja con longitudes de onda entre 5 y 37 micrones. Por lo tanto, fue el instrumento ideal para producir las primeras imágenes de Júpiter en las longitudes de onda más intensas que emite el planeta.



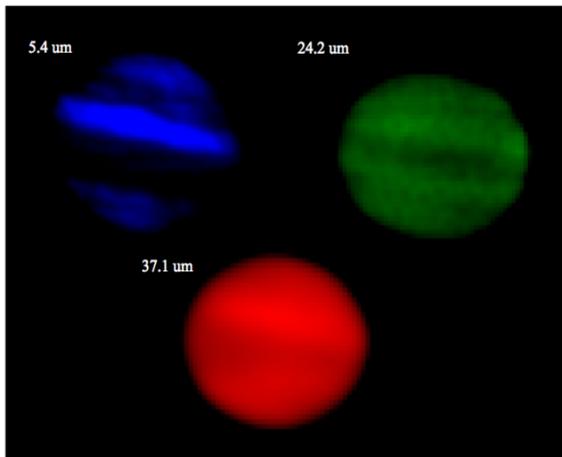
**Figura 1:** El sensor de imagen FORCAST (cámara infrarroja de objetos débiles para el telescopio SOFIA) consiste en el criostato rojo (contenedor frío) más las cajas electrónicas doradas que se muestran aquí, montadas en el telescopio SOFIA.

Las imágenes digitalizadas del FORCAST se almacenan como valores numéricos en una matriz de **pixeles** (elementos de imagen). Luego, los científicos pueden mostrar esos datos seleccionando **colores representativos** (también llamados *colores falsos*) que podemos ver y

que representan colores infrarrojos invisibles al ojo humano. Esto es un poco como el Traductor de Google: la información que no podemos procesar, en un idioma que no conocemos, se transforma en información que podemos procesar, en un idioma que sí conocemos.

**Los resultados y su interpretación:** El vuelo de *primera luz* de SOFIA fue el 26 de mayo de 2010. Entre los investigadores a bordo se encontraban dos de las personas que diseñaron y construyeron el FORCAST: el astrónomo Terry Herter y el ingeniero George Gull. Los acompañó el científico de SOFIA, Jim De Buizer.

El equipo tomó imágenes de Júpiter en tres longitudes de onda: 5.4, 24 y 37 micrones (Figura 2). Las imágenes de Júpiter de 37 micrones tomadas desde SOFIA tenían información nueva para los astrónomos. Después de que SOFIA aterrizara, Jim combinó las imágenes de Júpiter hechas por FORCAST en esas tres longitudes de onda, eligió un esquema de colores representativo, tal que la de 5.4 micrones se mostraba en azul, la de 24 micrones, en verde y la de 37 micrones, en rojo (Figura 3). Si las tres longitudes de onda fueran brillantes en un área particular de Júpiter, la combinación aparecería blanca (cabe recordar que mezclar luz no es lo mismo que mezclar pintura. Los colores rojo, verde y azul en una imagen digital, combinados en intensidades iguales, dan por resultado el blanco).



**Figura 2:** Imágenes de Júpiter en 5.4, 24 y 37 micrones obtenidas por el sensor de imagen FORCAST durante el vuelo de *primera luz* de SOFIA. Las imágenes de los componentes de Júpiter en las tres longitudes de onda se muestran con el esquema de color representativo elegido.

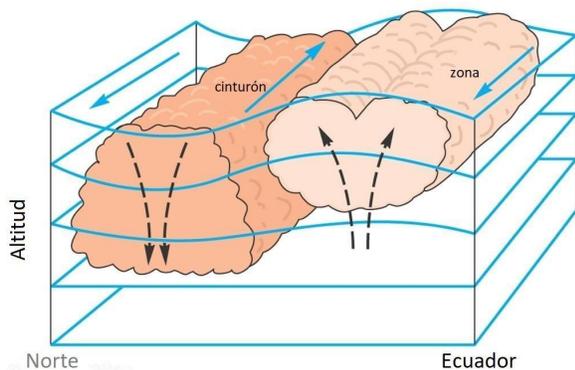


**Figura 3:** Imagen representativa de Júpiter en color, compuesta por la suma de las imágenes componentes, en tres longitudes de onda del infrarrojo medio y lejano. La región blanca más brillante, que emite intensamente radiación infrarroja en las tres longitudes de onda, es el Cinturón Ecuatorial Sur.

La franja horizontal justo debajo del ecuador de Júpiter, aparece blanca en la imagen compuesta; esto significa que Júpiter tiene una fuerte radiación en la ubicación de esa franja, en las tres longitudes de onda observadas (consulte la Figura 2). Otros lugares de Júpiter no emiten radiación infrarroja con tanta intensidad como las latitudes que se encuentran justo debajo del ecuador.

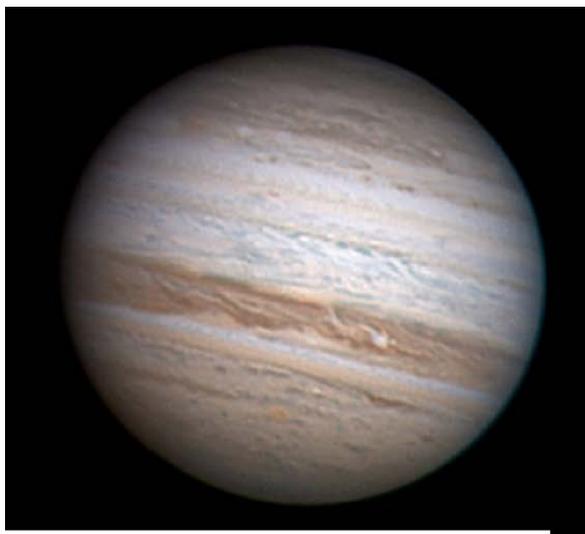
Como se señaló anteriormente, el modelo que habían calculado los astrónomos predecía que el calor interno de Júpiter habría de "filtrarse" de manera más o menos uniforme por todo el planeta; sin embargo, los datos del FORCAST mostraron, con mayor claridad que las observaciones anteriores, que Júpiter emite su calor interno principalmente en latitudes selectas.

La Figura 4 es un diagrama que muestra las zonas de latitud de Júpiter y los cinturones. Las zonas son regiones de nubes de cristales de hielo altas y frías, que son blancas en longitudes de onda visibles y son oscuras en longitudes de onda infrarrojas. Los cinturones son regiones donde vemos más profundamente las regiones cálidas de la atmósfera de Júpiter. La ubicación de la radiación infrarroja más fuerte de Júpiter, observada por SOFIA, la franja blanca brillante en la Figura 3, es el Cinturón Ecuatorial del Sur.



**Figura 4:** Cinturones y zonas latitudinales de Júpiter. En las latitudes del cinturón podemos ver más profundamente la atmósfera de Júpiter, hasta material más cálido. (Adaptado de Horizons, Seeds & Backman, © 2018 Cengage Learning).

El Cinturón Ecuatorial del Sur aparece en color marrón rojizo oscuro en longitudes de onda visibles (Figura 5). Ese color puede deberse a moléculas orgánicas formadas en las profundidades de Júpiter. Lo que los científicos aún no saben es por qué las zonas y cinturones están ubicados donde están, y si son estructuras superficiales o profundas en la atmósfera de Júpiter.



**Figura 5:** Imagen en longitud de onda visual de Júpiter, tomada aproximadamente al mismo tiempo que la imagen de la *primera luz* de SOFIA. La zona marrón rojiza más oscura corresponde a la franja blanca brillante en el infrarrojo, en los datos del FORCAST (Crédito: Anthony Wesley).

#### Recursos adicionales:

El comunicado de prensa original de la NASA sobre el vuelo de *primera luz* de SOFIA (en inglés):

<https://www.sofia.usra.edu/multimedia/science-results-archive/nasa%E2%80%99s-airborne-observatory-sees-%E2%80%9Cfirst-light%E2%80%9D-flight>

## **SOFIA. Estudio de caso científico:**

### **La nebulosa planetaria M2-9**

#### ***Cómo el Universo produce los elementos***

**Antes de leer, revise los siguientes términos clave (Glosario, páginas 7-10):**  
resolución angular, nebulosa, nucleosíntesis, nebulosa planetaria, medio interestelar (ISM).

**Antecedentes:** Los astrónomos que observaron el cielo durante los siglos XVIII y XIX descubrieron docenas de pequeñas nebulosas coloridas (nebulosa viene del latín *nebula*, que significa "nube"). Algunas de estas **nebulosas** son verdiazules y de forma circular. Los **planetas** Urano y Neptuno, que fueron descubiertos durante el mismo periodo, también son circulares y verdiazules. Más aún, esos planetas tienen el mismo tamaño aparente que las nebulosas. Pocos días de observación bastan para diferenciar un planeta de una nebulosa: los planetas se mueven en relación con las estrellas y las nebulosas no. Así que, esas pequeñas nebulosas circulares y verdiazules fueron apodadas **nebulosas planetarias**, debido a que eran fácilmente confundidas con planetas por impacientes cazadores de planetas.

Después de décadas de investigación, los científicos ahora saben que las nebulosas planetarias son nubes de gas expulsado por algunas estrellas durante las etapas finales de su existencia. Fotografías de nebulosas planetarias tomadas en el transcurso de muchos años revelan que se expanden, alejándose de sus respectivos puntos centrales. En el centro de cada nebulosa planetaria yace un objeto llamado **enana blanca**. Las enanas blancas son más calientes que el Sol, pero mucho más pequeñas, densas y menos luminosas. Sabemos que una enana blanca es el núcleo expuesto de una estrella extinta.

El material de la nebulosa planetaria se expande, se enfría y se desvanece hasta volverse invisible. Finalmente, la enana blanca es el “cadáver” de una estrella desaparecida. Con base en observaciones y modelos computacionales, este tipo de muerte estelar parece limitarse a estrellas que tienen más o menos la misma masa que nuestro Sol.

Durante el tiempo de vida de una estrella, las reacciones nucleares en su núcleo transforman el hidrógeno en elementos más pesados, como helio, carbono y oxígeno. Se llama **nucleosíntesis** al proceso de la formación de elementos. El material en la nebulosa planetaria en expansión contiene algunos de los elementos pesados producidos por la estrella. Con el tiempo, esos elementos se mezclan con el **medio interestelar (ISM)**.

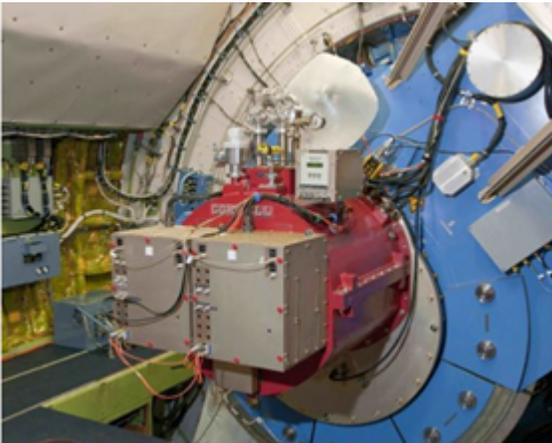
El material expulsado por una estrella moribunda puede, entonces, ser “reciclado” en la siguiente generación de estrellas y planetas que se formarán a partir del ISM. Existe interés entre los astrónomos por mejorar su comprensión de este proceso de reciclaje.

**El objetivo:** Raghvendra Sahai y Michael Werner, astrónomos del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, propusieron usar **SOFIA** para observar la nebulosa planetaria conocida como M2-9. El prefijo “M” en su denominación se refiere al hecho de que se encuentra en un catálogo de nebulosas planetarias recopilado por el astrónomo Rudolph Minkowski.

M2-9 es particularmente interesante para los científicos porque no tiene la forma esférica que tienen muchas de las nebulosas planetarias. Las estrellas moribundas en los centros de las nebulosas planetarias a menudo expulsan su material externo en forma de “burbujas” simétricas. En contraste, M2-9 tiene el sobrenombre de “La Mariposa” porque parece que tuviera dos alas que se extienden lejos del centro. Algo desconocido está ocasionando que el material de la nebulosa M2-9 sea expulsado solamente en dos direcciones. Raghvendra y Mike tenían curiosidad acerca de si el material en la nebulosa M2-9 es similar o diferente al material en otras nebulosas. Y si el material de M2-9 fuera diferente, se preguntaban si eso estaría de alguna manera relacionado con la forma inusual de M2-9.

**La investigación previa:** Muchos astrónomos han estudiado M2-9 en longitud de onda visible, usando observatorios terrestres. Raghvendra también observó esta nebulosa varios años antes usando el Telescopio Espacial Hubble. Después, junto con Mike, Raghvendra estudió M2-9 en longitudes de onda de **infrarrojo cercano** e **infrarrojo medio**, usando el Telescopio Espacial Infrarrojo Spitzer.

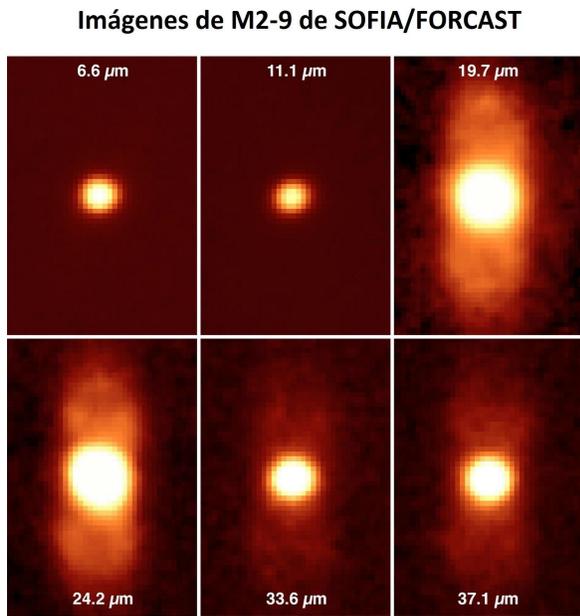
**El instrumento seleccionado:** Raghvendra y Mike formaron un equipo con colegas de EE. UU. y Europa, además de personal científico de SOFIA para hacer estudios ulteriores de M2-9. Decidieron usar el **sensor de imagen** de infrarrojo medio FORCAST (Figura 1).



**Figura 1:** El sensor de imagen FORCAST (Cámara infrarroja para objetos tenues del telescopio SOFIA) consiste en un criostato rojo (contenedor frío) más las cajas doradas de electrónicos que se muestran aquí, montadas en el telescopio SOFIA.

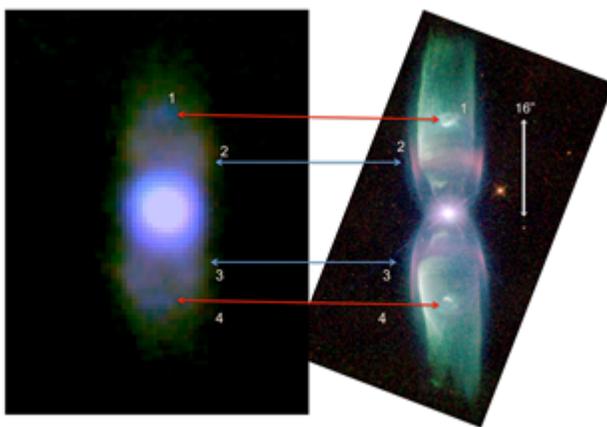
Raghvendra y Mike tuvieron tres razones importantes para elegir SOFIA y FORCAST para el nuevo estudio de M2-9: 1) Sus observaciones con el Spitzer indicaban que los granos de polvo en el material expulsado de M2-9 tienen temperaturas que, de acuerdo con la **Ley de Wien**, emitirían, sobre todo, radiación infrarroja media. El sensor de imagen FORCAST justamente detecta luz infrarroja media; 2) Debido a que SOFIA opera en la estratósfera, ellos podrían hacer observaciones en longitudes de onda mayores a los 25 **micrones**, que son imposibles de observar con los telescopios terrestres; 3) El telescopio SOFIA tiene tres veces el tamaño del telescopio Spitzer. Debido al efecto de **difracción**, el telescopio SOFIA tendría una **resolución angular** tres veces mejor que la del telescopio Spitzer. Al usar SOFIA podrían observar detalles tres veces más pequeños en M2-9. (Lea SOFIA. Panorama científico, sección II.B para más información acerca de los telescopios y la resolución angular).

**Resultados e interpretación:** Raghvendra y Mike volaron dos veces en SOFIA, en mayo y en junio de 2011, para realizar las observaciones de M2-9 que habían propuesto. Tomaron imágenes de M2-9 en longitudes de onda de 6.6, 11.1, 19.7, 24.2, 33.6 y 37.1 micrones (Figura 2).



**Figura 2:** Imágenes de la nebulosa planetaria M2-9 en seis longitudes de onda infrarrojo medio. La estrella enana blanca central es lo único que se observa en las imágenes de 6.6 y 11.1 micrones, debido a que es más caliente que el polvo en la nebulosa; por lo que, según la Ley de Wien, la emisión más fuerte se encuentra en las longitudes de onda más cortas. En las longitudes de onda de 19.7 y 24.2 micrones, la luz proviene principalmente del polvo emitido con temperaturas alrededor de 100 K. El efecto de difracción en todas estas longitudes de onda hace que la enana blanca central se vea mucho más grande de lo que es en realidad.

El equipo también tenía una imagen de M2-9 tomada por el telescopio Hubble en longitudes de onda visibles (Figura 3, derecha) para compararla con su imagen infrarroja (Figura 3, izquierda). Las áreas brillantes en la imagen de longitud de onda visual del Hubble muestran luz de los átomos de gas. En comparación, las áreas brillantes en la imagen infrarroja muestran luz emitida por granos de polvo sólidos. Esos granos se condensan a medida que el flujo de salida se aleja de la enana blanca central y se enfría. Los científicos buscaban rasgos comunes en ambas imágenes. Esto indicaría regiones de la nebulosa con concentraciones de gas y polvo. Los rasgos que no coincidieran indicarían aquellas regiones de la nebulosa donde el gas y el polvo están separados.



**Figura 3:** (Izquierda) imagen compuesta de M2-9 tomada por FORCAST. Los colores representativos: rojo = 19.7 micrones, verde = 24.2 micrones y azul = 37.1 micrones. (Derecha) imagen en longitudes de onda visibles del telescopio espacial Hubble. Los rasgos del polvo en la imagen infrarroja están relacionados mediante flechas numeradas con los rasgos del gas en la imagen visual. La difracción hace que la estrella central en la imagen de SOFIA se vea mucho más grande que en la imagen de longitudes de onda visibles del Hubble.

El equipo de Raghvendra y Mike encontró correlaciones claras entre los densos nudos de gas en la emisión de M2-9 y las ubicaciones donde se concentraban los granos de polvo (Figura 3). Al comparar cuánta luz infrarroja se producía por el polvo en cada longitud de onda, el equipo pudo usar un modelo matemático para estimar el tamaño de los granos de polvo de M2-9. Los científicos se sorprendieron al encontrar que los granos en la emisión de M2-9 parecían ser una combinación de dos tamaños muy diferentes: eran o de 0.1 micrones, aproximadamente, o más grandes que 1 micrón.

Por lo general, los granos del ISM miden 0.1 micrones o menos. El equipo de Raghvendra y Mike esperaban encontrar el tamaño típico de los granos del ISM en el material que expulsa la nebulosa M2.9 hacia el ISM. El origen de los granos más grandes es un misterio. El equipo M2-9 piensa que las partículas más grandes no se condensan en las burbujas de la misma forma que lo hacen los granos pequeños. En su lugar, suponen que las partículas más grandes ya se encontraban presentes en el disco de material alrededor de la enana blanca, pero fueron atrapadas y arrastradas por el flujo en expansión. El mismo disco podría actuar como una barrera, forzando a la emisión a dirigirse en dos direcciones para formar las “alas” de M2-9. Si esta hipótesis es correcta, indicaría el tipo de relación entre la forma y la composición de la nebulosa M2-9 que Raghvendra y Mike estaban buscando.

#### **Recursos adicionales:**

El comunicado de prensa original de la NASA sobre las observaciones M2-9 de SOFIA (en inglés):

<https://www.sofia.usra.edu/multimedia/science-results-archive/nasas-sofia-captures-images-planetary-nebula-m2-9>

## SOFIA. Estudio de caso científico:

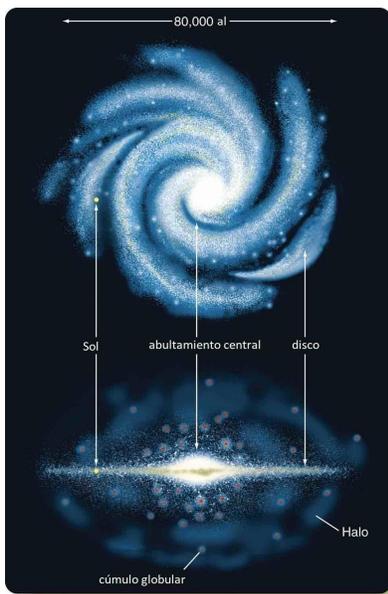
### Anillo circumnuclear de la Vía Láctea

#### *Anillo de polvo alrededor de un agujero negro*

Antes de leer, revise los siguientes términos clave (Glosario, páginas 7-10): agujero negro, anillo circumnuclear, Galaxia o Vía Láctea, Sagittarius A\* (Sgr A\*).

**Antecedentes:** Hasta inicios del siglo XX, los astrónomos pensaban que nuestra galaxia, **la Vía Láctea**, era un disco de estrellas con solo algunos miles de años luz de diámetro. También pensaban que nuestro **Sistema Solar** se ubicaba cerca del centro galáctico.

Esta percepción cambió en la década de 1920, después de que el astrónomo Harlow Shapley midiera las distancias de grupos de estrellas llamados **cúmulos globulares**. Shapley descubrió que estos cúmulos están dispuestos en un enjambre concentrado alrededor de un lugar a decenas de miles de años luz de nosotros. Concluyó que este lugar era el centro de nuestra galaxia (Figura 1). En otras palabras, Shapley dedujo que los objetos que él podía ver (cúmulos globulares) estaban dispuestos alrededor de un punto que él no podía ver (el centro galáctico). Esto es como observar a un grupo de buitres volar en círculos muy lejos, y deducir la ubicación de su alimento sin tener que ver el alimento siquiera.



**Figura 1:** Concepción artística de la Vía Láctea, vista desde afuera: De frente (arriba) y de perfil (abajo). Nuestro Sistema Solar, que incluye el Sol y la Tierra, se ubica en el delgado disco galáctico, a 27,000 años luz del centro galáctico. Los cúmulos globulares estudiados por Shapley, cada uno con cientos de miles de estrellas, se ubican en un halo alrededor del disco, concentrados hacia el centro. (Adaptado de *Foundations, Seeds & Backman*, © 2016 Cengage).

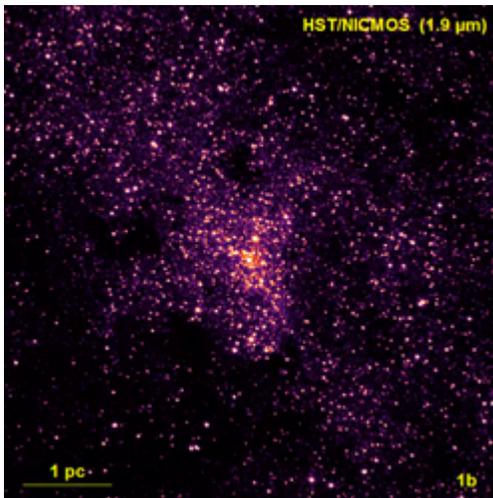
Cuando los astrónomos observan las longitudes de onda visibles hacia la región del espacio que Shapley identificó como el centro galáctico, no ven nada extraordinario. Esto se debe a que el polvo del **medio interestelar** que se encuentra en el plano de la Galaxia bloquea la luz. Para resolver este problema, el astrónomo Eric Becklin utilizó un detector de **infrarrojo cercano** para mapear el centro galáctico. La luz infrarroja penetra el polvo interestelar más fácilmente que la luz visible, y las estrellas ordinarias producen cantidades sustanciales de luz infrarroja cercana. El detector de infrarrojo cercano de Eric podía "ver" a través del polvo, lo que le permitía medir dónde es mayor la densidad de estrellas. Esto determinó la ubicación precisa del centro galáctico,

justo donde Shapley predijo que debería estar. (Lea la sección II.D de SOFIA. Panorama científico, sobre los tipos de objetos que se estudian mejor en longitudes de onda infrarrojas).

En la década de 1970, los astrónomos encontraron una fuente inusual de radiación de radio en la posición del centro galáctico determinada por Becklin. Llamaron a esta fuente de radio **Sagittarius A\*** (**Sgr A\***, para abreviar). *Sagittarius* significa que está en la dirección de la constelación de Sagittarius. La fuente de radio más brillante de cada constelación se denomina "A". Finalmente, "\*" significa que es una fuente puntual, como una estrella. Los astrónomos tienen evidencia de que Sgr A\* es un **agujero negro** supermasivo. Se supone que la emisión de radio proviene de un **disco de acreción**, un disco de material caliente comprimido que gira alrededor del agujero negro.

**La investigación previa:** Unos años después de haber descubierto el centro galáctico, Eric Becklin y otros astrónomos utilizaron el **Observatorio Aerotransportado de Kuiper (KAO)** para hacer un mapa de infrarrojo lejano de la región alrededor de Sgr A\*. Encontraron un anillo de gas y polvo de unos 5 años luz de radio, que denominaron **anillo circumnuclear (CNR)**. El CNR a veces se conoce como "el Anillo" para abreviar.

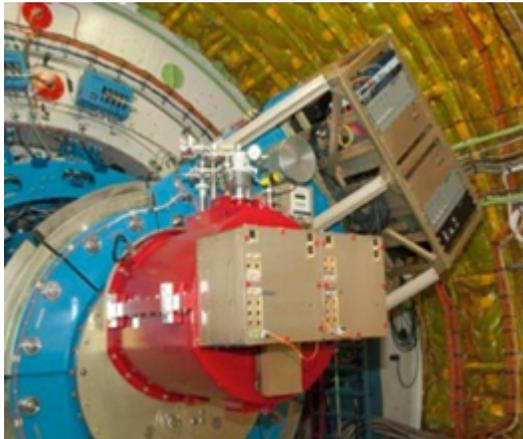
Posteriormente, el telescopio espacial Hubble tomó una imagen de infrarrojo cercano de esta región (Figura 2). Esa imagen indica que el centro galáctico contiene millones de estrellas, además de nubes de gas y polvo, lo suficientemente densas como para bloquear la luz de las estrellas de fondo. En la Figura 2, esas nubes se ven como espacios en blanco.



**Figura 2:** Imagen de infrarrojo cercano del telescopio espacial Hubble (longitud de onda = 1.9 **micrones**) de la región central de la Vía Láctea. La barra de escala muestra un segmento de 1 pc (parsec; 3.3 años luz). Toda la imagen tiene unos 26 años luz de diámetro. En esta longitud de onda, vemos principalmente la luz proveniente de millones de estrellas agrupadas alrededor del centro de la Galaxia.

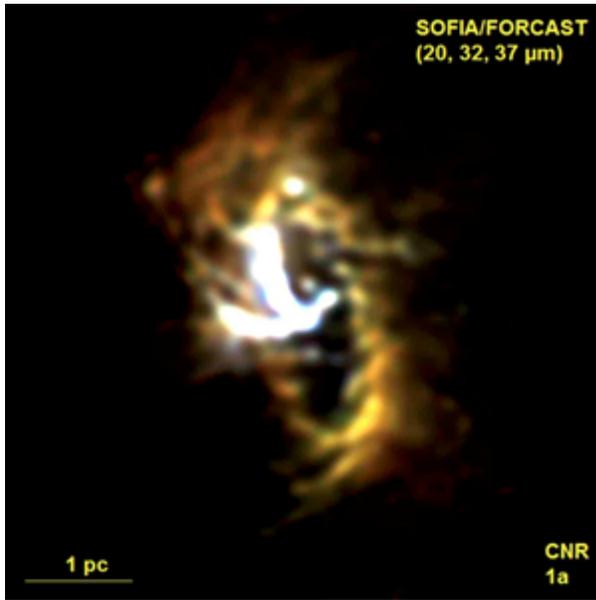
**El objetivo:** Ryan Lau y su profesor de doctorado de la Universidad de Cornell, Terry Herter, querían estudiar el centro galáctico utilizando **SOFIA**. A Terry y sus colaboradores se les asignó un tiempo de observación garantizado en SOFIA para estudiar los objetos de su elección, ya que Terry dirigió el equipo que diseñó y construyó el sensor de imagen FORCAST. Ellos decidieron usar parte de ese tiempo garantizado para hacer un mapa mejorado del Anillo, para determinar mejor sus propiedades. Esa información podría usarse para comprender mejor cómo se formó el Anillo y cómo está evolucionando.

**El instrumento seleccionado:** El plan de Ryan, Terry y sus compañeros de equipo era usar SOFIA y el sensor de imagen de **infrarrojo medio** FORCAST (Figura 3) para sus observaciones del Anillo. Las observaciones anteriores del KAO indicaban que el anillo tiene una fuerte emisión en las longitudes de onda detectadas por FORCAST. Además, el campo de visión del FORCAST se adapta bien al tamaño del Anillo.



**Figura 3:** El sensor de imagen FORCAST (Cámara infrarroja de objetos débiles para el telescopio SOFIA) consta del criostato rojo (recipiente frío) más las cajas electrónicas doradas que se muestran aquí, montadas en el telescopio SOFIA.

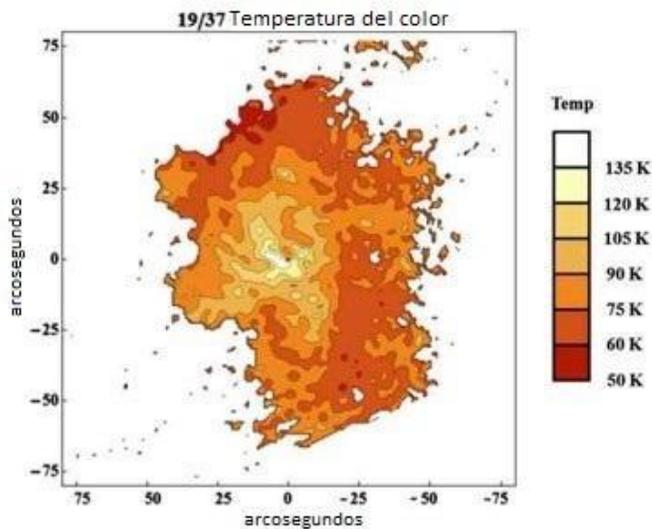
**Los resultados y la interpretación:** En junio de 2011, Ryan, Terry y otros científicos de su equipo volaron a bordo de SOFIA para observar el anillo circumnuclear de la Galaxia. El equipo de Ryan tomó imágenes del Anillo en longitudes de onda de 20, 32 y 37 micrones. Ryan eligió un esquema de **color representativo** de azul = 20 micrones, verde = 32 micrones y rojo = 37 micrones para representar la luz infrarroja del Anillo. Luego, combinó las tres imágenes de una longitud de onda cada una, en una imagen compuesta final (Figura 4).



**Figura 4:** Imagen compuesta de SOFIA/FORCAST en el infrarrojo medio del centro galáctico, con el mismo campo de visión que la Figura 2. El anillo circumnuclear (CNR) es prominente en las longitudes de onda del infrarrojo medio, pero la luz de las estrellas es relativamente insignificante.

Primero, el equipo de Ryan comparó su imagen en el infrarrojo medio del centro galáctico con la imagen del Telescopio Espacial Hubble de la misma región (Figura 2). La imagen de SOFIA / FORCAST muestra claramente el anillo circumnuclear. Los puntos en blanco en la imagen del Hubble son áreas donde el anillo es más denso y bloquea la luz de las estrellas de fondo. El elemento blanco en el interior del Anillo, que parece un pájaro en vuelo, son en realidad tres "brazos" de gas. Esos brazos se extienden desde el borde interior del anillo hasta su centro. Sgr A\* se localiza donde se cruzan los tres brazos. Los brazos tienen un color representativo blanco porque su material irradia fuertemente en las tres longitudes de onda observadas.

Para el siguiente paso en el análisis, Ryan produjo un mapa de temperatura del Anillo (Figura 5). Las temperaturas se determinaron utilizando la **Ley de Wien** con respecto a la relación entre la temperatura de un objeto y la longitud de onda de emisión más fuerte. (Lea la sección I.C de SOFIA. Panorama científico, para obtener más información sobre la Ley de Wien).



**Figura 5:** Mapa de temperaturas del anillo con base en la relación de cada ubicación del brillo en longitudes de onda de 19 y 37 micrones. Este mapa de temperatura tiene el mismo campo de visión que las Figuras 2 y 3. Observe que las temperaturas más altas están en el centro del anillo y en los “brazos” que pueden verse en la Figura 4. Esa es la región del cúmulo estelar central lleno de estrellas que se ve en la Figura 2.

Las temperaturas en el Anillo oscilan entre 50 y 85 **Kelvin** y las temperaturas más altas (áreas de color amarillo claro) se encuentran en el borde interior del Anillo y en los tres "brazos". Las temperaturas más bajas (de color anaranjado intenso) se encuentran en el borde exterior del anillo. La interpretación del equipo de Ryan es que esto significa que una fuente de radiación cerca del centro calienta al Anillo. Los científicos habían planteado previamente la hipótesis de que el Anillo podría calentarse debido a los millones de estrellas acumuladas en el centro, o por la radiación del disco de acreción de Sgr A\*. (Nota: El disco de acreción no es el CNR. El disco de acreción del agujero negro es demasiado pequeño como para verlo en estas imágenes). Ryan calculó que los millones de estrellas en el centro del Anillo serían más efectivos para calentar el Anillo que la radiación más débil del disco de acreción

Ryan y su equipo examinaron cuidadosamente la forma del Anillo. Llegaron a la conclusión de que es circular e inclinado en relación con nuestra línea de visión; la inclinación es lo que hace que el anillo parezca elíptico. Esto concuerda con modelos anteriores hechos por otros científicos que se basaron en mediciones de movimientos de gas en el Anillo.

### Recursos adicionales:

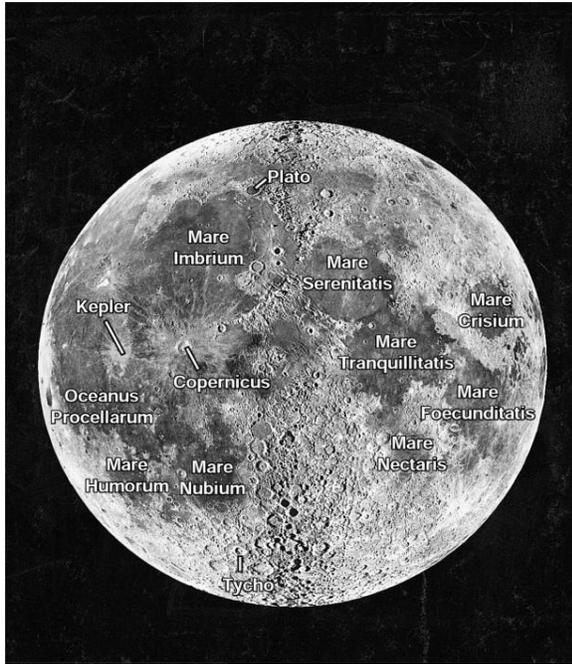
El comunicado de prensa original de la NASA sobre las observaciones del anillo circumnuclear de SOFIA (en inglés):

<https://www.sofia.usra.edu/multimedia/science-results-archive/sofia-spots-recent-starbursts-milky-way-galaxys-center>

## SOFIA. Estudio de caso científico: Agua en el suelo lunar iluminado por el Sol *Secretos escondidos a la luz de la Luna*

Antes de leer, revise los siguientes términos clave (Glosario, páginas 7-10):

Mare, volátiles, espectro/espectros, línea espectral, micra, espectrómetro, grisma, pixel, revisión por pares



**Figura 1:** Imagen de la Luna con rasgos de la superficie etiquetadas. (De *Foundations, Seeds* y Backman © 2016 Cengage Learning)

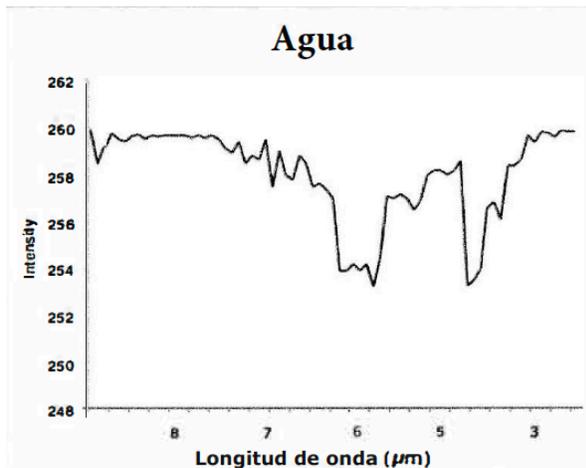
**Antecedentes:** Arriba se muestra una fotografía de la Luna llena con etiquetas en algunos rasgos de su superficie. Los primeros astrónomos que usaron telescopios pensaron que las regiones grandes y oscuras eran cuerpos de agua y les dieron nombres acuáticos, tales como Mar de la Tranquilidad. Mare Tranquillitatis, en latín, a la derecha del centro, en la imagen (“**Mare**” significa “mar”). Esos “mares” son, de hecho, planicies muy uniformes que fueron creadas por lava que fluyó sobre la superficie lunar y que se solidificó hace mucho tiempo. El Mar de la Tranquilidad fue el sitio de alunizaje de Apollo 11 de la NASA, en 1969, cuando el primer ser humano pisó la Luna.

**Investigación previa:** El análisis detallado de las muestras de rocas lunares que trajeron los astronautas de las misiones Apollo sorprendió enormemente a los científicos planetarios. Esas rocas tienen una composición muy similar a la de la corteza y el manto terrestre. Pero, en algún momento, ese material se calentó a una temperatura lo suficientemente alta como para que las sustancias más **volátiles**, incluyendo el agua, fueran eliminadas. Los “mares” lunares son en realidad, extraordinariamente secos.

A finales de la década de 1990, el orbitador Lunar Prospector detectó grandes cantidades de hidrógeno en los polos de la Luna. Para determinar si ese hidrógeno corresponde a la presencia

de agua ( $H_2O$ ), la NASA desarrolló el Satélite de Detección y Observación de Cráteres Lunares (LCROSS, por sus siglas en inglés). LCROSS tenía dos partes: una parte era un proyectil que se impactó en la superficie lunar, levantando una nube de polvo y fragmentos rocosos. La otra era un artefacto espacial equipado con instrumentos que voló a través de la nube y midió su composición. LCROSS fue dirigido hacia un cráter cerca del polo sur de la Luna. Se especuló que el suelo del cráter, extremadamente frío y permanentemente en la sombra, tendría agua congelada atrapada en la arena. La información de LCROSS confirmó que una parte del hidrógeno observado en los polos lunares proviene de cristales de hielo de agua.

Cuando la luz de un objeto se dispersa en los colores que lo componen, lo que se le llama **espectro**, aparecen porciones estrechas en el espectro llamadas **líneas espectrales**. Las líneas espectrales son “huellas digitales” que identifican diferentes átomos y moléculas. La figura 2 muestra un ejemplo de un espectro de vapor de agua en forma de gráfica de intensidad de luz (eje vertical) en función de la longitud de onda (eje horizontal). Las disminuciones en intensidad (“valores mínimos”) en las longitudes de onda de  $\approx 3$  a 4 y 6 **micras** corresponden a líneas espectrales de absorción del vapor de agua. Observa que las líneas espectrales del agua en forma sólida, líquida y gaseosa no aparecerán necesariamente en las mismas longitudes de onda. También observa que, dependiendo de la temperatura del material y la longitud de onda de la línea espectral específica, un espectro puede mostrar líneas de emisión que aparecen como incrementos en la intensidad, en lugar de disminuciones, en relación con el resto del espectro.



**Figura 2:** Espectro de absorción del vapor de agua. (Adaptado de *Project SPECTRA! Goldilocks and the Three Planets*, U. Colorado LASP).

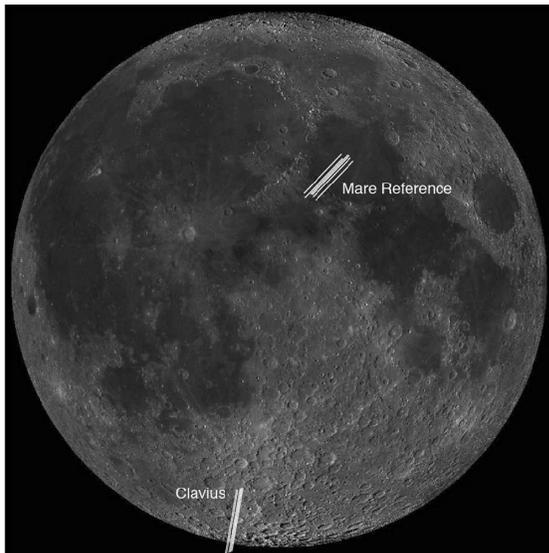
Otros artefactos espaciales antes y después de LCROSS detectaron una línea espectral ancha en la luz solar reflejada desde la superficie lunar en longitudes de onda alrededor de 3 micras. Esa línea espectral fue ocasionada por algunas moléculas sin identificar que llevaban hidrógeno. Cabe destacar, que se encontró en regiones iluminadas por la luz solar, lejos de los polos. Pero las mediciones realizadas solo en la longitud de onda de 3 micras no pueden determinar si el hidrógeno se encuentra en moléculas de hidroxilo (OH) o en moléculas de agua ( $H_2O$ ).

**El objetivo:** La estudiante de posgrado de la Universidad de Hawái, Casey Honniball, y su asesor, Paul Lucey, sabían que encontrar una línea espectral en 6 micras, además de la línea en 3

micras, ayudaría a distinguir entre OH y H<sub>2</sub>O en el suelo lunar. También sabían que no era posible detectar una radiación de 6 micras proveniente de ningún cuerpo celeste, ya fuera desde la Tierra o desde algún artefacto espacial existente; pero sabían que si SOFIA volaba por encima del vapor de agua en la atmósfera de la Tierra, podrían detectar el espectro en 6 micras.

Casey y Paul formaron un equipo que incluyó a colaboradores de la Universidad de Colorado, el Instituto de Tecnología de Georgia, la Universidad Johns Hopkins y la NASA. Solicitaron y se les concedió tiempo de observación en SOFIA para comprobar si en la Luna hay suelo que contenga agua lejos de los polos.

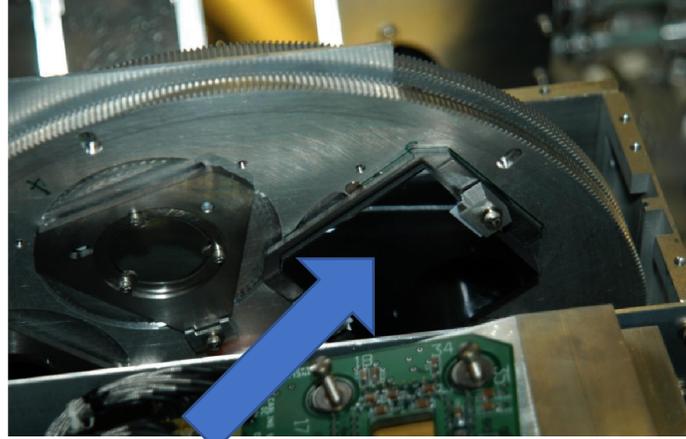
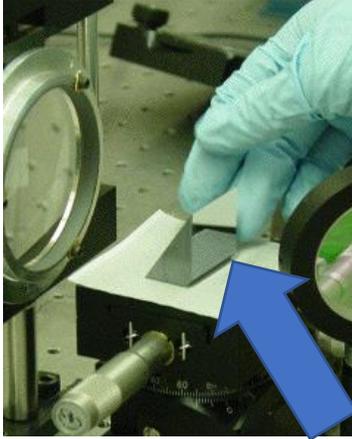
Casey y sus colaboradores decidieron enfocarse en la región que rodea al gran cráter Clavius, que esperaban que fuera fácil de detectar en las cámaras guía de SOFIA. También observaron otras regiones, como punto de comparación, cerca de Mare Serenitatis (o “Mar de la Serenidad”) donde los astronautas de las misiones Apollo reunieron muestras de rocas que resultaron estar demasiado secas (Figura 3).



**Figura 3:** Las “referencias” al cráter Clavius y al Mare (Mare Serenitatis) observadas por SOFIA indicadas en una imagen del orbitador Lunar Reconnaissance Orbiter (Honniball *et al.* 2021, *Nature Astronomy* 5, 121, datos extendidos figura 1, usada con autorización).

**Instrumento seleccionado:** el **sensor de imagen** FORCAST opera en longitudes de onda en infrarrojo medio. El rango de longitudes de onda de FORCAST incluye 6 micras, apropiado para el estudio del agua lunar. Así que este fue el instrumento que eligieron Casey y sus colaboradores para su proyecto. (Vea “SOFIA. Panorama científico, sección II.E” para mayor información acerca de los instrumentos científicos de SOFIA).

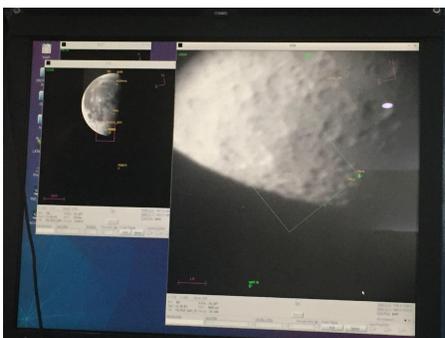
El equipo solicitó el uso de una **grisma** (por su acrónimo en inglés; prismas de rejillas) para convertir a FORCAST en un **espectrómetro** capaz de medir espectros.



**Figura 4:** Grisma de 4 a 8 micras. **Figura 5:** Grisma en la rueda de filtros de FORCAST. (Ennico *et al.* 2006, Proc. of SPIE Vol. 6269 1Q, figuras 8a y 9, usadas con autorización).

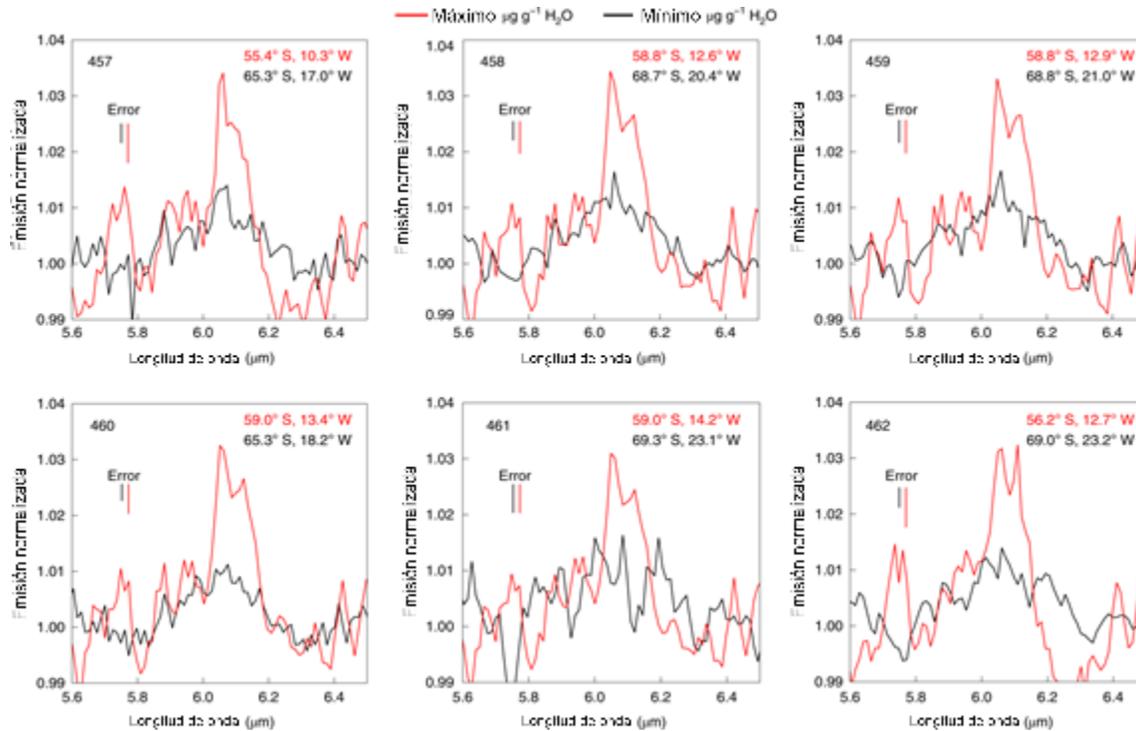
Se instala una grisma en la rueda de filtros del instrumento (Figura 5). La rueda de filtros se controla mediante un software que maneja el operador del instrumento. La grisma puede colocarse en la trayectoria de la luz que entra por un telescopio y es enviada al detector a través del instrumento. El resultado es que la luz se dispersa en una serie de espectros, uno por cada **pixel** en la imagen. En cada exposición, FORCAST obtiene luz de una ranura rectangular, que cubre una parte de la Luna, de hasta un tamaño de 4.5 x 360 kilómetros (2.8 x 220 millas).

Se podría pensar que las observaciones de la Luna serían muy sencillas, pero no es el caso. La Luna está en constante movimiento en su órbita alrededor de la Tierra. Para que el telescopio mantenga su objetivo tiene que rastrearlo a diferente velocidad de la que se usa para observar estrellas y galaxias. Por supuesto, esto es especialmente difícil con el telescopio de SOFIA, que está también en movimiento constante. Además, la Luna es mucho más brillante que los objetivos típicos de las observaciones de SOFIA; se deben colocar filtros delante de las cámaras de rastreo para bloquear parcialmente la luz (Figura 6).



**Figura 6:** La Luna vista por las cámaras guías del telescopio SOFIA con filtros que bloquean la luz; vista desde la consola del educador. (NASA / SOFIA / Instituto SETI).

**Resultados e interpretación:** En 2018, Casey y su equipo tomaron los primeros espectros lunares. Llevaron los datos a sus instituciones respectivas para un análisis más detallado. La señal de agua lunar en 6 micras, cerca del cráter Clavius,, resultó ser bastante intensa. Los primeros resultados fueron tan impresionantes que la directora del observatorio SOFIA, Margaret Meixner les otorgó tiempo extra para confirmar sus observaciones en el año 2019.



**Figura 7:** Doce espectros en infrarrojo medio de la superficie lunar cerca del cráter Clavius (Honniball *et al.* 2021, *Nature Astronomy* 5, 121, figura 1, usada con autorización).

La figura 7 muestra los datos totalmente analizados. Cada panel muestra dos espectros de una de las seis regiones de la ranura rectangular observadas en la superficie lunar cerca de Clavius. Los espectros que se muestran como curvas rojas son de las ubicaciones dentro de la ranura con relativa abundancia de agua. Esos espectros tienen picos de emisión (señales intensas) en longitudes de onda alrededor de las 6 micras. Los espectros que se muestran como curvas negras son de regiones cercanas con menor abundancia de agua, pero no igual a cero; se identifican por picos menores alrededor de las 6 micras. La ubicación en la superficie de la Luna en cada espectro está indicada por los valores de latitud y longitud lunar, en la esquina superior derecha de cada panel. El rango de incertidumbre en los espectros se indica por el tamaño de las barras de error, en la parte superior izquierda de cada panel.

La intensidad de la señal de agua varió ampliamente entre las doce regiones que se observaron cerca de Clavius (Figura 7). Casey y su equipo calcularon que la cantidad de agua se encontraba en un rango entre 100 y 400 microgramos por gramo de suelo. La cantidad promedio es igual a una botella de agua de 12 onzas (350 ml) en cada metro cúbico de suelo lunar. En contraste, las regiones observadas cerca de Mare Serenitatis tienen significativamente menos agua. El equipo de investigación especuló que el agua debe estar atrapada en granos de arena o perlas de vidrio (partículas de arena derretida y resolidificada) de manera que los rayos solares severos que inciden sobre el suelo lunar no la evaporan.

Casey y sus colaboradores escribieron sus resultados en un artículo científico, “Moléculas de agua detectadas por SOFIA en el lado de la Luna iluminado por el Sol”, que enviaron a la revista

*Nature Astronomy*. Su artículo fue evaluado anónimamente por científicos expertos en campos relacionados. Ese proceso se llama “**revisión por pares**” y es un protocolo normal en la publicación de cualquier artículo científico. El artículo del agua lunar fue aceptado para su publicación en octubre de 2020, momento en el cual la NASA realizó un comunicado de prensa sobre estos sorprendentes resultados.

Casey recibió su grado de doctorado por parte de la Universidad de Hawái y obtuvo una posición postdoctoral en el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA, en Maryland. Continúa como líder de su equipo realizando observaciones de agua lunar con SOFIA en otras regiones de la Luna.

Las detecciones de agua de LCROSS y SOFIA en un cráter lunar a la sombra y en suelo iluminado por el Sol provocaron un gran cambio en la forma de pensar sobre la Luna. Existe agua en el suelo lunar, quizá la suficiente como para mantener una colonia humana en la Luna. Ese H<sub>2</sub>O podría no solo proveer a los colonizadores de agua potable, sino también es una fuente potencial de combustible y oxígeno. Estos valiosos suministros podrían extraerse del suelo lunar en lugar de llevar desde la Tierra todo lo que los colonizadores humanos necesitan.

#### **Recursos adicionales:**

Las publicaciones originales de NASA y SOFIA con respecto a la detección de agua lunar:  
<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-sofia-discovers-water-on-sunlit-surface-of-moon>  
<https://www.sofia.usra.edu/multimedia/science-results-archive/sofia-detects-water-moon>

Honniball *et al.* Artículo en revista técnica: <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01222-x>

**Embajadores de Astronomía Aerotransportada del SMD SciAct de NASA**

**Astronomía en infrarrojo y longitudes de onda múltiples**

**© 2021 SETI Institute**