

MANUAL DE RADIOASTRONOMÍA

ALMA en la escuela



Tabla de Contenidos

1. De Jansky a ALMA

- 1.1 Las observaciones de Jansky
- 1.2 Los primeros radiotelescopios
- 1.3 Elementos básicos de ALMA
- 1.4 Formación de imágenes en un radiotelescopio
- 1.5 Un telescopio, muchas antenas

2. La física de la radioastronomía

- 2.1 La radiación electromagnética
- 2.2 La radiación en nuestro día a día
- 2.3 Origen de la radiación electromagnética
- 2.4 El viaje de las ondas por el espacio
- 2.5 Trabajando a gran altitud

3. Explorando nuestros orígenes cósmicos

- 3.1 El Big Bang
- 3.2 La química del Universo
- 3.3 Formación de estrellas y planetas
- 3.4 El estudio del Sol
- 3.5 El entorno de nuestro Sol

4. Actividades

5. Glosario

Las palabras resaltadas en el texto del Manual están explicadas en el Glosario ubicado al final de éste.

6. Láminas

Imagen de la portada

Arriba: Visión tridimensional del gas expulsado de NGC 253 visto por ALMA. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) / Erik Rosolowsky.

Abajo: Composición de una vista de ALMA. Crédito: ESO/B. Tafreshi

Edición: Valeria Foncea, Jefa de Comunicaciones y Educación de ALMA

Diseño: Alejandro Peredo, Diseñador de ALMA

Asesoría Científica: José Gallardo e Ignacio Toledo, Astrónomos de ALMA

Asesoría Pedagógica: Pablo Torres, Fundación Sparktalents

Basado en: "El Universo invisible" de Universe Awareness (UNAWA) y "Explorando nuestros orígenes cósmicos - Material educativo sobre ALMA" del Observatorio Europeo Austral (ESO)

Traducciones al español: Ney Fernández y Unidad de Astronomía de la Universidad de Antofagasta.

Prólogo

Desde tiempos inmemoriales el cielo y las estrellas han fascinado a los seres humanos. Sin embargo, recién con la invención del telescopio en 1609 pudimos empezar a estudiar objetos astronómicos en detalle, transformando la astronomía y permitiendo potenciar sus descubrimientos hasta niveles insospechados gracias a los avances tecnológicos.

De esta forma hoy es posible estudiar el Universo observando otros tipos de radiación, distintos de la [luz "visible"](#) o [radiación óptica](#). Las ondas de radio, infrarrojas, [rayos gamma](#), ultravioleta y [rayos X](#) brindan a los astrónomos atisbos de un mundo completamente nuevo: el Universo "invisible".

Se requerirán muchas generaciones más de astrónomos para develar todos los secretos del Universo. De ahí que sea tan importante para el futuro de la astronomía y para la ciencia en general, fomentar el interés de los niños, y ayudar a sus profesores para guiarlos de la mejor forma.

Este documento está dirigido principalmente a docentes que quieran ampliar sus conocimientos de radioastronomía en general y sobre el observatorio ALMA en particular. Se incluyen también algunas actividades que pueden ser integradas en la sala de clases o como parte de un taller extra-programático. Si bien para cada una de ellas se recomiendan asignaturas y niveles donde utilizarse, se confía en el criterio del docente para la decisión final de cómo integrarlas en sus planificaciones, pues solo él conoce sus estudiantes y está al tanto del proyecto curricular de su establecimiento.

El texto se organiza en cuatro capítulos. El primero propone un breve desarrollo histórico de la radioastronomía y aspectos generales de sus principios físicos en comparación con los [telescopios](#) ópticos. El segundo capítulo profundiza en los conceptos físicos que sustentan la radioastronomía, que permiten comprender las implicancias para la observación, tales como refracción, reflexión, poder de resolución, entre otros. El capítulo tercero explora las líneas de investigación en radioastronomía que pueden ser abordadas por ALMA y algunas conclusiones que se espera comprobar, es un breve estado del arte de la investigación en radioastronomía.

Finalmente, el capítulo cuarto incluye un conjunto de actividades para trabajar con los estudiantes, las cuales se organizan de acuerdo al nivel de profundidad, partiendo por las más sencillas y terminando con algunas un poco más complejas y que se relacionan con las ideas desarrolladas en los capítulos anteriores. También se propone a qué niveles del sistema escolar chileno puede ser integrada cada actividad, en las clases de ciencias naturales.

Este manual asume que los docentes manejan a un nivel elemental conceptos de física, química y álgebra, por esta razón no se desarrollan conceptos básicos que pueden encontrarse en cualquier libro de ciencias. No obstante, se ha considerado incluir varios de ellos en el glosario, para una referencia más rápida.

Asimismo, no es el objetivo de este manual cubrir los temas abordados en profundidad o entregar detalles técnicos ni modelos teóricos de mayor complejidad, sino que introducir dichos temas y aportar con un conjunto de actividades didácticas, como un primer paso. Al final de cada capítulo se presenta un conjunto de preguntas para favorecer la reflexión y comprensión de los textos.

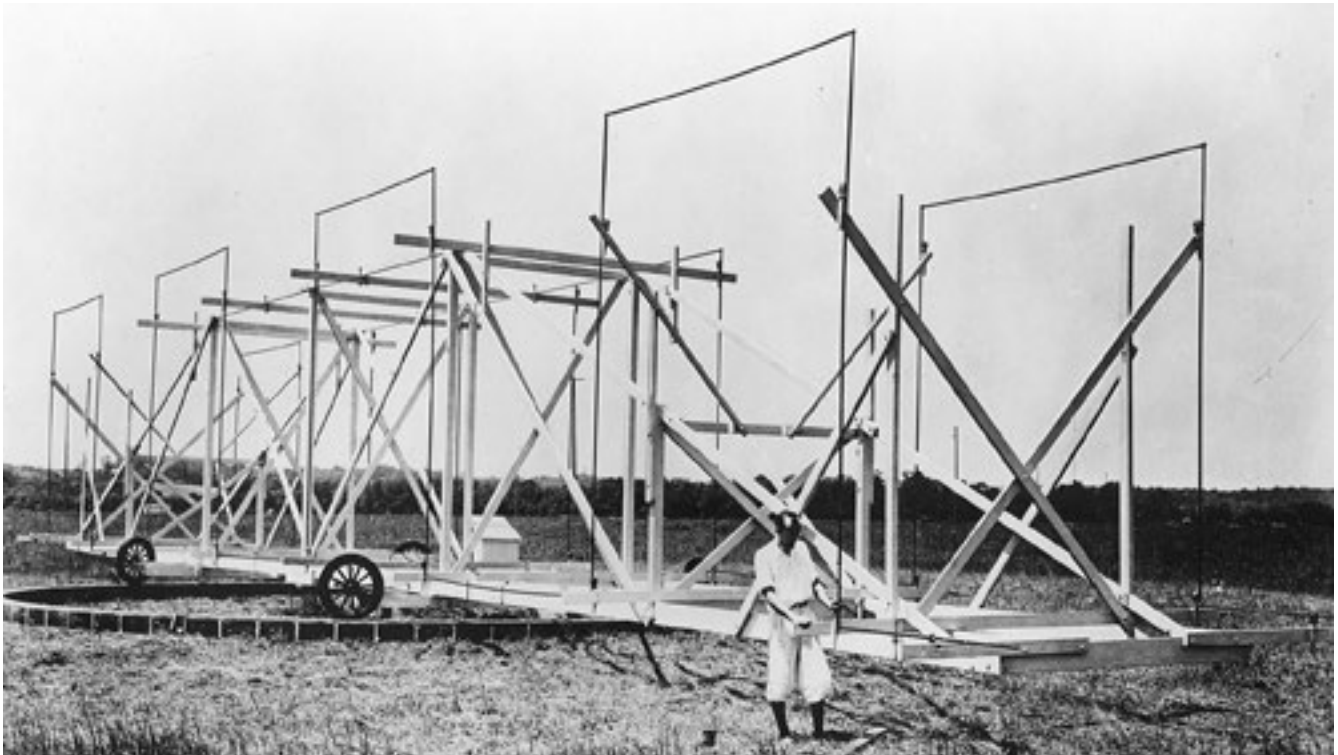
1. De Jansky a ALMA

En las alturas del Llano de Chajnantor en los Andes chilenos, a 5000 metros de altitud, se encuentra ALMA, el *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* o Gran Conjunto Milimétrico/submilimétrico de Atacama. A más de ochenta años de la primera detección de ondas de radio provenientes del espacio exterior, ALMA se constituye como un observatorio de vanguardia, que estudiará la luz de algunos de los objetos más fríos en el Universo.

1.1 Las observaciones de Jansky

Llegar a ALMA significa recorrer un gran camino, no sólo porque se ubica en un lugar casi inaccesible para el ser humano —a 5.000 metros sobre el nivel del mar y en medio del desierto más seco del mundo— sino también porque representa un inmenso avance para esta área de la astronomía que observa lo invisible, constituyendo a este observatorio en un hito de la [radioastronomía](#) mundial.

Este camino comenzó de manera casi accidental en 1931, cuando el ingeniero estadounidense Karl G. Jansky hiciera sus primeras observaciones de [radiofuentes](#) extraterrestres. Durante esos años, los Laboratorios Bell le habían encomendado investigar la [banda de onda corta](#) para posibles usos de comunicación y necesitaba evaluar posibles interferencias que pudieran presentarse en la atmósfera. Mediante una [antena](#) diseñada y construida por él mismo, se dedicó a recibir ondas de radio generadas por fuentes naturales como tormentas eléctricas y rayos.



La antena estaba montada en una plataforma giratoria que permitía detectar señales de radio provenientes de cualquier dirección. Cerca de la estructura de la antena había un cobertizo, en el que se mantenía un sistema de registro análogo de “lápiz y papel” —similar al funcionamiento de un sismógrafo— con el cual Jansky pudo registrar señales de tormentas cercanas, tormentas eléctricas distantes y una señal constante y débil de origen desconocido. Durante varios meses en que registró los datos, la señal desconocida siempre estuvo presente. El proceso que realizaba Jansky consistía en rotar la antena una vuelta completa (360°) durante 20 minutos. Así, en una hora la antena apuntaba tres veces en la misma dirección geográfica. En la imagen 2, se observa uno de los registros de la señal en un lapso de 2 horas.

Imagen 1. Antena carrusel de Jansky. Las ruedas permitían girar la estructura y apuntar en diferentes direcciones. La antena estaba diseñada para recibir ondas de 20,5 MHz (1 MHz = 10^6 Hz) de frecuencia (con una longitud de onda de 14,6 metros aprox.) que la ubican en la banda de onda corta (SW). En comparación, una radio FM puede sintonizar ondas que van de los 88.0 a 107.0 MHz (3,4 a 2,8 metros respectivamente) Crédito: NRAO-Green Bank.

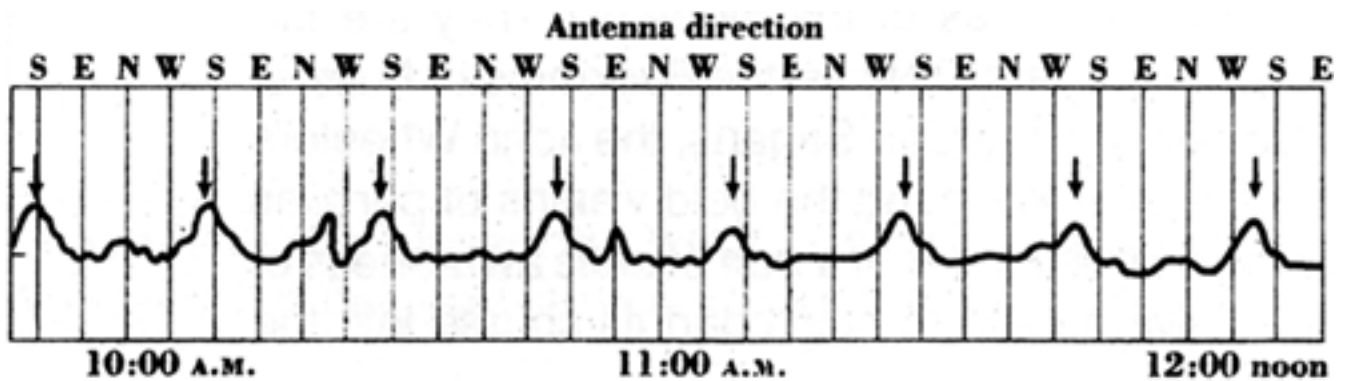


Imagen 2. Parte de lo registrado por Jansky en febrero de 1932. Arriba se indica la dirección geográfica: Sur (S), Este (E), Norte (N) y Oeste (W); mientras que abajo está la hora. Cada división vertical marca un tiempo de 5 minutos. Las flechas indican la cresta o máximo observado cada 20 minutos, conforme la antena barría el plano de nuestra galaxia.

Jansky había considerado inicialmente al Sol como fuente de esta señal desconocida, pero conforme pasaban los días, observó que la aparición de la cresta se retrasaba casi cuatro minutos diarios (ver nota sobre la diferencia entre día solar y sideral). Esta diferencia de tiempos llevó a Jansky a concluir que la fuente que emitía estas ondas de radio se encontraba en la [Vía Láctea](#), cuya mayor intensidad se ubicaba en su zona central, en la [constelación](#) de Sagitario.

Este descubrimiento fue ampliamente divulgado a través de diversos medios e incluso publicado en el New York Times el 5 de mayo de 1933. Jansky tenía intenciones de continuar con las mediciones para investigar estas fuentes del espacio exterior, sin embargo, los Laboratorios Bell no consideraban estas señales como un problema y le asignaron otro proyecto, quedando esta tarea en manos de futuros astrónomos. La unidad de densidad de flujo espectral, en el Sistema Internacional, toma el nombre de [Jansky](#).

Nota sobre la diferencia entre día solar y día sideral

La definición de día parece simple: es el tiempo que le toma a un planeta, satélite o cuerpo celeste en completar una rotación sobre su eje, sin embargo, para describir el movimiento de un cuerpo necesitamos de un Sistema de Referencia, esto es, algo con respecto a lo cual podemos decir que un determinado cuerpo completó una rotación o, de forma más general, que se movió. Si decimos que la Tierra gira sobre su eje, ¿con respecto a qué punto podemos decir que se ha completado una rotación?

Esto nos lleva a dos definiciones: el día solar y el día sideral (o sidéreo). El primero considera la medida del tiempo de rotación de la Tierra respecto al Sol y el segundo respecto a las estrellas.

El día solar es el tiempo que transcurre desde el mediodía de un día hasta el mediodía del día siguiente. Cuando decimos mediodía nos referimos específicamente al momento del día en el que el Sol pasa por su máxima altura en el cielo, lo

que también se expresa como el momento en el que el Sol pasa el [meridiano](#) celeste (am y pm del sistema horario de 12 horas: ante meridiano y pasado meridiano)

Pero la Tierra se mueve en una órbita elíptica en torno al Sol y la recorre a una rapidez que varía durante el año, esto hace que el tiempo entre dos mediodías no sea el mismo. Para simplificar esta situación, se asume que existe un Sol ficticio, respecto del cual la Tierra tiene una órbita circular, la que recorre a rapidez constante. Esta rapidez corresponde a su rapidez promedio en la órbita elíptica, conduciendo a un día solar de 24 horas.

El movimiento de traslación de la Tierra es responsable también de que el día sideral (que se mide respecto a las estrellas) sea más corto en comparación al solar, aproximadamente en 4 minutos, dando un día sideral de 23h 56m. En la imagen siguiente se observa una comparación de ambos.

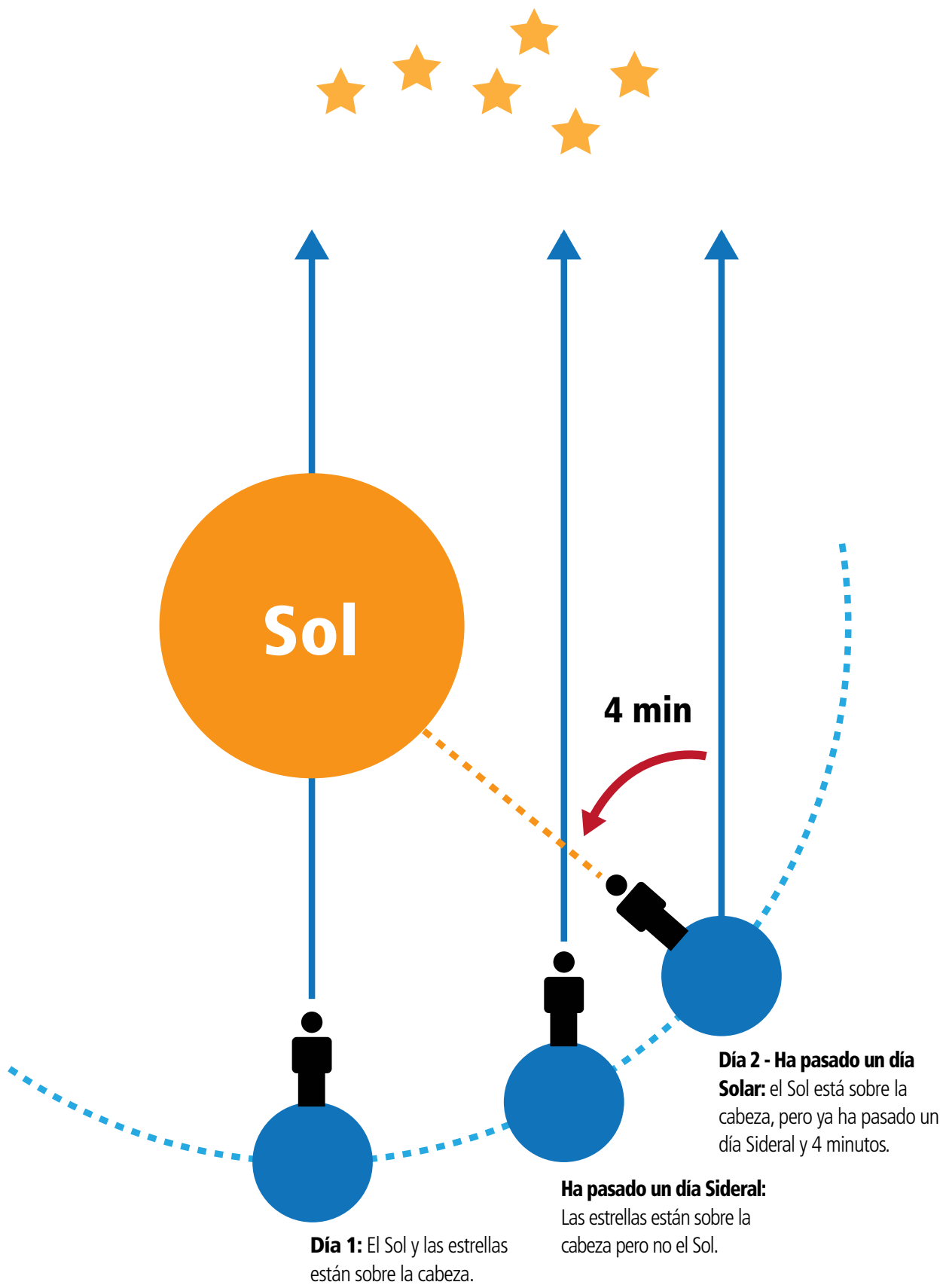


Imagen 3. Esquema que representa la diferencia entre día Sideral y día Solar.

1.2 Los primeros radiotelescopios



Imagen 4. Primer radiotelescopio construido por Grote Reber en 1937. Crédito: NRAO-Green Bank

sistemas de Interferometría, como el Very Large Array (VLA) de Nuevo México con 27 antenas, y ALMA que, inaugurado en 2013, constituye el más grande y moderno en la actualidad.

Afortunadamente, muchos científicos estaban interesados en continuar con el trabajo iniciado por Jansky, entre ellos destacaron el ingeniero estadounidense Grote Reber, quien en 1937, construyó para este efecto un [radiotelescopio](#) casero en el patio de su casa (ver imagen 4).

A comienzo de los años 60, el radiotelescopio de mayor envergadura era el Jodrell Bank de 76 metros. Se sumarían posteriormente los gigantes radiotelescopios RATAN-600 de Rusia, con 576 metros de diámetro, y Arecibo de Puerto Rico con 305 metros de diámetro.

Años después, el astrónomo británico Martin Ryle desarrollaría la técnica conocida como Interferometría, que usa diferentes radiotelescopios ubicados a grandes distancias unos de otros, y que pueden captar las ondas de radio como si fuesen un único gran telescopio. Este procedimiento permitió el descubrimiento en 1968 del primer [pulsar](#).

Con el tiempo y los avances técnicos, los gigantes radiotelescopios serían reemplazados por conjuntos de radiotelescopios, complementados por

1.3 Elementos básicos de ALMA

La parte más visible de un radiotelescopio es su disco o plato [reflector](#) (ver imagen 5). En el caso de ALMA, la mayoría de los reflectores tiene un diámetro de 12 metros. Cada reflector tiene la misma función que el espejo de un telescopio óptico: la de captar la radiación proveniente de objetos astronómicos distantes y dirigirla hacia un receptor que mide los niveles de dicha radiación.

Lo que distingue a ambos tipos de telescopio es la [longitud de onda](#) de la radiación absorbida: un telescopio óptico capta luz visible y un radiotelescopio como ALMA, ondas de radio.



Como veremos mas adelante, la luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético y se caracteriza justamente por ser observada por el ojo humano. Las ondas de radio, en cambio, pertenecen a un grupo más amplio de ondas, como por ejemplo, las que se captan en una radio FM común. En el caso de ALMA, las ondas detectadas se conocen como radiación milimétrica y submilimétrica, ya que sus longitudes de onda se encuentran en ese rango de medida (de milímetros a milésimas de milímetro).

[Imagen 5.](#) Conjunto de 13 antenas, en el llano de Chajnantor. Crédito: ESO

Si se observa la imagen 6, se aprecia claramente una de las principales diferencias entre la antena de un radiotelescopio y el espejo primario de un telescopio óptico.

Tanto un telescopio óptico como una antena de ALMA utilizan una superficie parabólica para recolectar las ondas que estudiarán (visibles y de radio, respectivamente). Sus apariencias difieren en el material que recubre sus superficies parabólicas: en el caso de un telescopio óptico se utilizan componentes similares a los espejos, mientras que una antena de ALMA usa paneles que permiten reflejar las ondas de radio con una alta eficiencia.

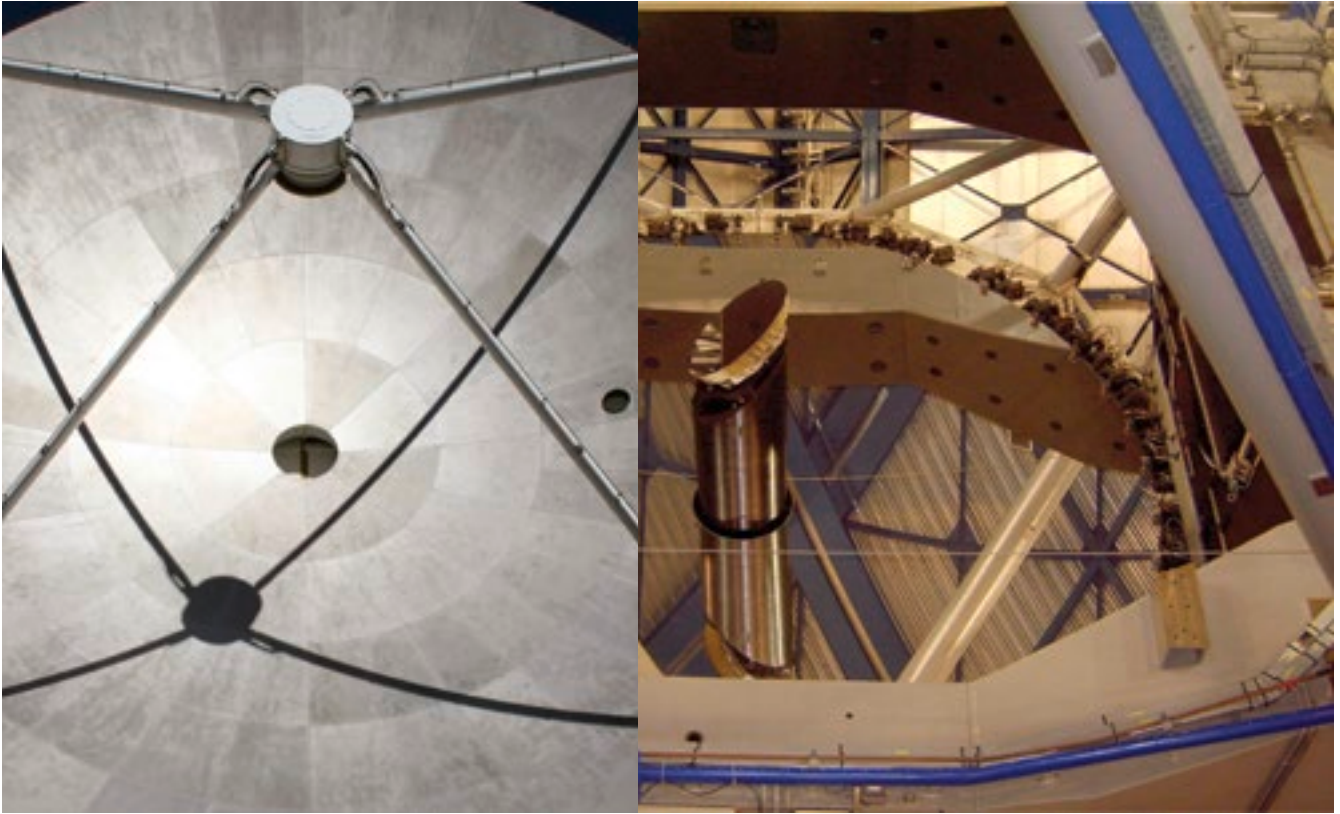


Imagen 6.

Detalle del disco de una antena de ALMA (izquierda) y del espejo primario de uno de los telescopios óptico del VLT (derecha). Créditos: izq. ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) der. Pablo A. Torres

En ambos casos las superficies reflectantes deben ser prácticamente perfectas, ya que cualquier imperfección impediría que el telescopio obtenga datos correctamente. Además de esto, se requiere que el mecanismo motriz que mueve al telescopio sea de tan alta precisión, que efectivamente permita apuntarlo al objeto celeste en estudio. Por ejemplo, ALMA podría apuntar a la posición de ambos polos de una pelota de golf ubicada a 15 kilómetros de distancia.

1.4 Formación de imágenes en un radiotelescopio

Cuando se piensa en un telescopio óptico, es sencillo comprender cómo se forma una imagen. Tanto en los telescopios refractores como en los reflectores, la luz es conducida por los diversos elementos ópticos, (lentes en los primeros y espejos en los segundos), hasta el ocular, que es donde ponemos nuestro ojo o ubicamos una cámara fotográfica.

Pero, ¿cómo se forman imágenes a partir de ondas de radio que no son visibles a nuestros ojos? El proceso es un poco más complejo. Primero, los radiotelescopios captan las ondas de radio provenientes del Universo, que son reflejadas en la superficie de su disco. Este, a su vez gracias a su forma parabólica, las concentra en el [punto focal](#). En este punto focal se encuentra un receptor que recibe las ondas de radio, las amplifica y digitaliza, permitiendo que su información -que incluye la intensidad de las ondas captadas y la posición exacta del punto en el Universo del cual provienen- pueda ser convertida en imágenes.

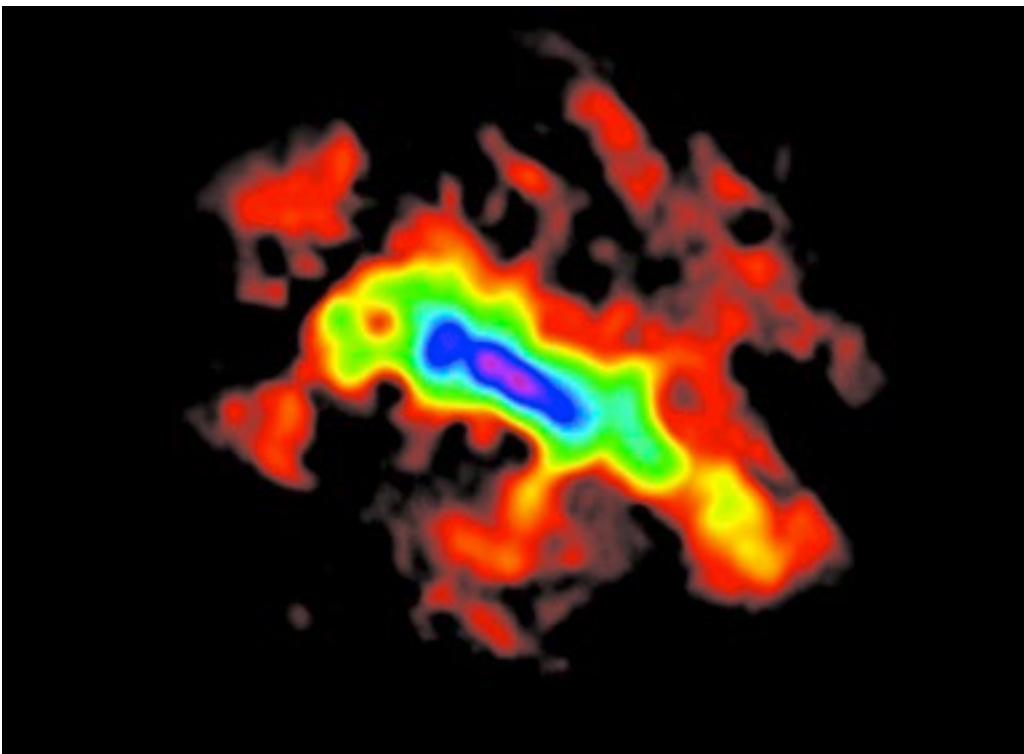


Imagen 7. Galaxia del Escultor.
Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

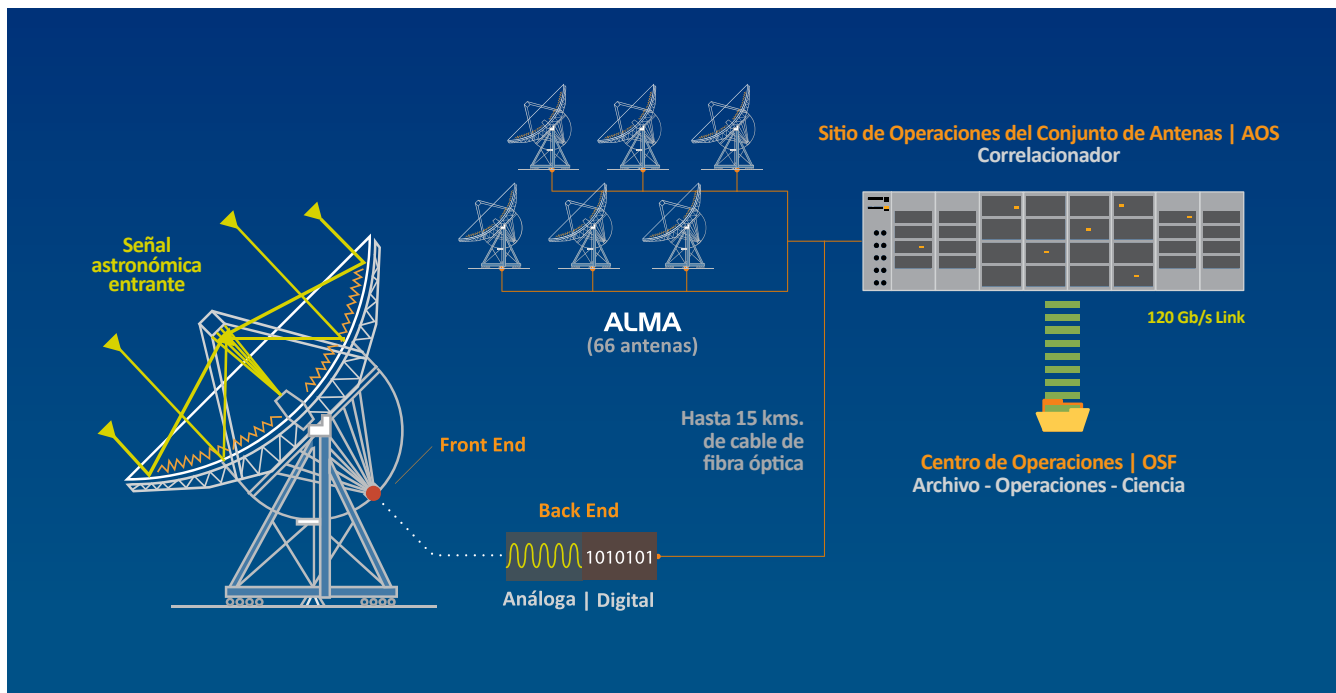
Segundo, y luego de registrar la señal de radio proveniente de un punto específico del Universo, la antena del radiotelescopio se mueve para apuntar al punto contiguo, donde vuelve a registrar la señal. De esta forma, hace un "barrido" de la zona en el cielo de manera secuencial.

Toda la información de las intensidades de las ondas de radio provenientes de cada zona del Universo es analizada y asociada a su respectiva posición de manera única. Usando herramientas matemáticas, los astrónomos son capaces de utilizar esta información y construir imágenes del objeto celeste en estudio, como en la imagen 7 que nos muestra la Galaxia del Escultor.

Los astrónomos pueden pasar horas o incluso días “escaneando” un objeto en el cielo con el fin de disponer de toda la información que necesitan y les puede tomar semanas procesar los datos.

En el caso de ALMA, las señales recibidas por cada antena se combinan, gracias a una técnica llamada interferometría, que es justamente lo que lo convierte en el más potente en la actualidad. Es un verdadero desafío técnico, pues requiere combinar las señales provenientes de todas las antenas y componentes electrónicos, para producir una imagen en alta resolución del objeto observado, con una precisión de una millonésima de millonésima de arcosegundo (distancia angular). Es decir, ALMA es un interferómetro, que puede funcionar como un único telescopio gigante equivalente a una antena de 16 kilómetros de diámetro.

Imagen 8.
Diagrama de operaciones de ALMA.
Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



Autoevaluación

1. ¿Cuál fue el aporte de Karl G. Jansky a la radioastronomía?
2. ¿Por qué una diferencia de 4 minutos, en la aparición de la cresta de señal, llevó a Jansky a afirmar que la señal provenía de la Vía Láctea?
3. ¿Cuál fue la idea clave de Martin Ryle en que se basa la Interferometría?
4. ¿Cuál es la principal diferencia entre un telescopio óptico y un radiotelescopio?
5. En términos generales, ¿cómo se obtiene una imagen en un radiotelescopio?
6. ¿Por qué se habla de ALMA como un único radiotelescopio, si cuenta con 66 antenas?

1.5 Un telescopio, muchas antenas

Cada una de las 66 antenas de ALMA –de 12 y 7 metros de diámetro- son un logro de alta tecnología y diseño ingenieril, que además deben soportar las condiciones extremas del lugar donde están emplazadas: el llano de Chajnantor, donde soplan fuertes vientos, la luz es intensa, las temperaturas varían entre 20 y -20 grados Celsius y, aunque se trata de una de las zonas más áridas del planeta, algunas veces al año deben soportar la nieve.

Pero las antenas de ALMA tienen más características sobresalientes. Puesto que la potencia de un interferómetro depende de la ubicación de cada una de las antenas respecto a las otras, éstas puedan reubicarse según las necesidades de observación del Universo. Es decir, a diferencia de un telescopio que se construye y permanece fijo en un mismo lugar para siempre, las antenas de ALMA son lo suficientemente sólidas como para ser desplazadas entre plataformas de concreto sin que sus mecanismos de alta precisión sufran daños. Este proceso se realiza con dos camiones gemelos –Otto y Lore- diseñados especialmente para este efecto (Imagen 9).

Debido a la gran cantidad de antenas y la posibilidad de reubicarse, la superficie total del interferómetro de ALMA es levemente superior a 6500 metros cuadrados, equivalente a una cancha de fútbol. Las antenas pueden ser distribuidas a través del llano, a distancias entre sí que van desde los 150 metros hasta los 16 kilómetros, en otras palabras, gracias a la técnica de la Interferometría y el reubicamiento, ALMA cuenta con un “zoom” variable y muy poderoso para escudriñar el Universo.

Mientras más lejos se ubiquen las antenas unas de otras, se pueden captar más detalles del objeto observado. De esta forma, ALMA es capaz de sondear el Universo a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas con una sensibilidad y resolución sin precedentes, y con una visión hasta diez veces más precisa que la del telescopio espacial Hubble.



Imagen 9. Otto y Lore, los transportadores de antenas de ALMA, en plena acción. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2. La física de la radioastronomía



Vista aérea del OSF. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

Con nuestros ojos o con un telescopio óptico podemos captar apenas una pequeña fracción de toda la información que nos envía el Universo. La luz visible, es sólo una diminuta porción de todo el espectro de [radiación electromagnética](#) que, en su totalidad, va desde las ondas de radio (bajas [frecuencias](#) y longitudes de onda largas), hasta los rayos gamma (altas frecuencias y longitudes de onda muy cortas).

2.1 La radiación electromagnética

Captar las ondas electromagnéticas provenientes del Universo nos permite conocer más sobre los objetos que las generan. Pero ¿qué es y cómo se genera una [onda electromagnética](#)?

Las ondas son un fenómeno que vivimos a diario: el sonido, la luz, las olas del mar o cuando arrojamos una piedra a un lago tranquilo, son algunos ejemplos que nos permiten observar el mismo patrón. En todos ellos se propaga una perturbación a través de un medio dado, como la presión en el aire, la ola en el mar o la luz en el vacío. Y en todos estos casos hay transporte de energía, pero no de materia.

En general las ondas se caracterizan por su longitud, [frecuencia](#) y amplitud (ver Imagen 10). La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas en una onda, se mide en metros y sus unidades derivadas (cm, mm, nm, entre otras). La frecuencia, por otro lado, es la cantidad de veces que se produce una oscilación o ciclo en un segundo, se mide en [Hertz](#) (Hz), donde 1 Hz equivale a 1 ciclo en cada segundo.

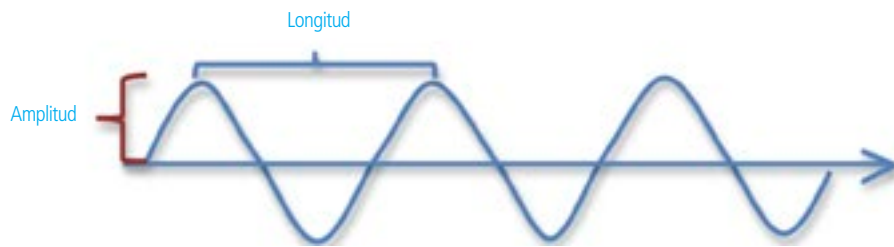


Imagen 10. Descripción de una onda, donde se marca su longitud de onda, cuando el eje x corresponde a la distancia.

Longitud y frecuencia se relacionan entre ellas a través de la velocidad de la onda ("v"). En el caso de las ondas sonoras, la velocidad del sonido tiene un valor de 321 m/s. Mientras que para ondas electromagnéticas, la velocidad se denomina con la letra "c", conocida como la velocidad de la luz y tiene un valor de $c=300.000.000$ m/s.

La ecuación que relaciona estas variables es:

$$c = \lambda f$$

Es decir, la velocidad de una onda se obtiene del producto de la longitud de onda y su frecuencia.

Por otro lado, la amplitud de la onda A, corresponde a la "altura" de la cresta medida desde la línea de base y se relaciona con la energía que transporta la onda.

¡El cielo es un espectáculo permanente de fuegos artificiales que no podemos ver! Esta radiación invisible tiene propiedades diferentes según la longitud de onda, en cierto sentido, es como si tuvieran [colores](#) diferentes. El espectro electromagnético se divide en distintas categorías según su longitud de onda: radio, [microonda](#), infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

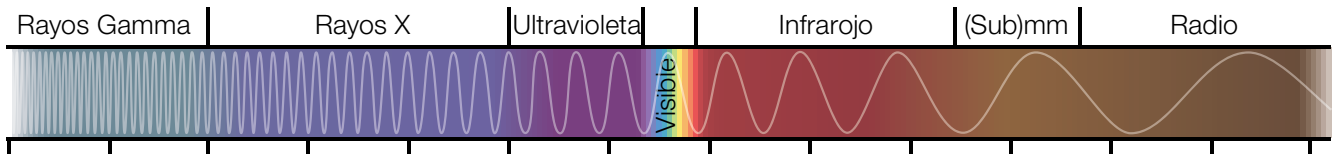


Imagen 11. Espectro electromagnético. El rango de luz visible es muy estrecho, comparado con la extensión del espectro electromagnético. Hacia la izquierda, la radiación tiene más energía y hacia la derecha menos. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

Al observar el espacio con telescopios capaces de detectar distintos tipos de luz, o dicho de otra forma, distintos tipos de radiación electromagnética (ver Imagen 11), los astrónomos pueden estudiar de manera más amplia y profunda el Universo. Sin estos telescopios, algunos objetos celestes permanecerían totalmente invisibles. Por ejemplo, cuando una estrella se encuentra detrás de una nube de polvo, la luz visible que ésta emite no llega hasta nosotros, pero las ondas de radio sí pueden atravesar dicha nube, permitiendo detectar la estrella.

Al mismo tiempo, al observar la radiación electromagnética de un objeto en distintas longitudes de onda, podemos conocer los diferentes procesos físicos que ocurren en él. Cada conjunto de observaciones, en diferentes tipos de radiaciones, aportan información complementaria, como se observa en la imagen 12.

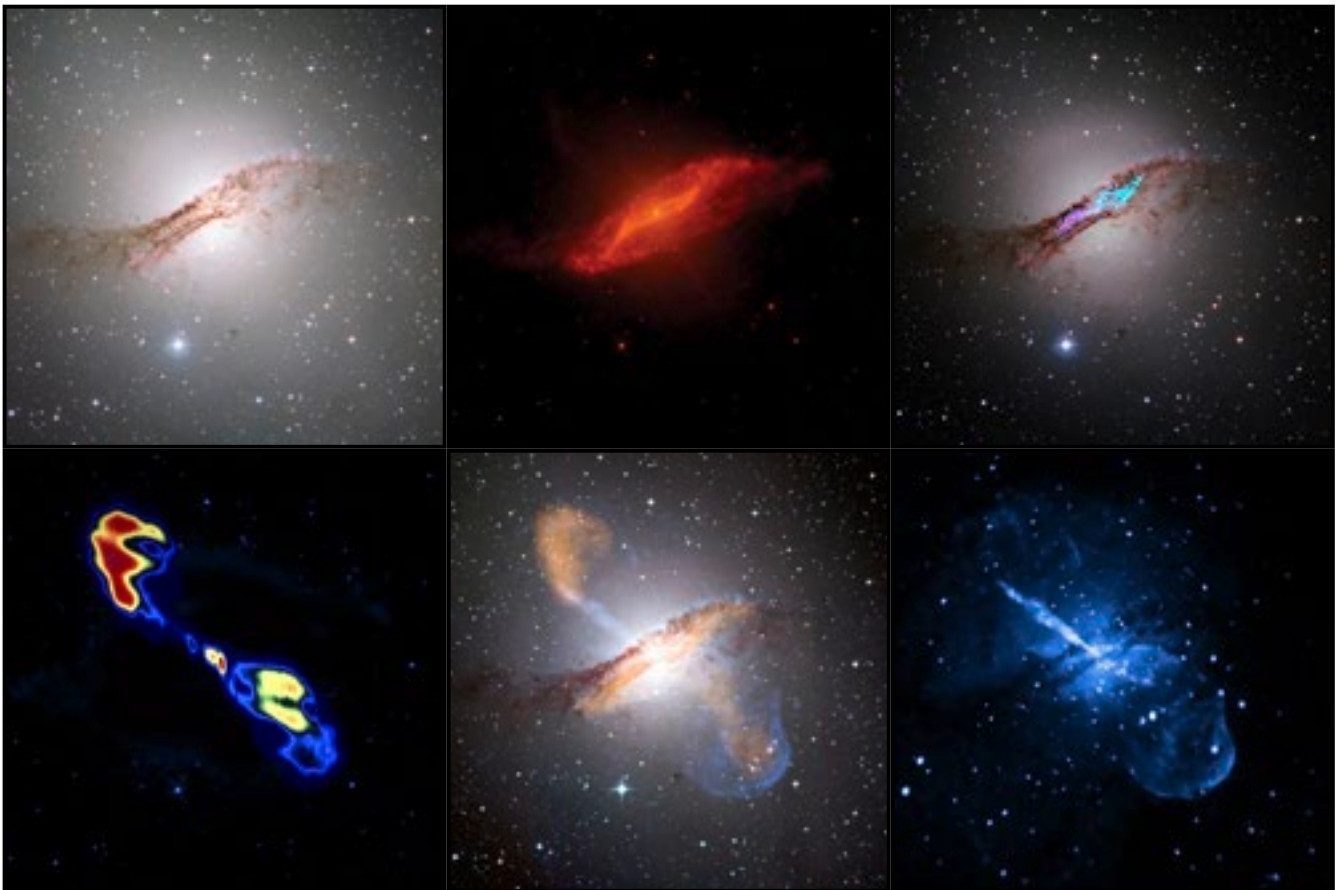


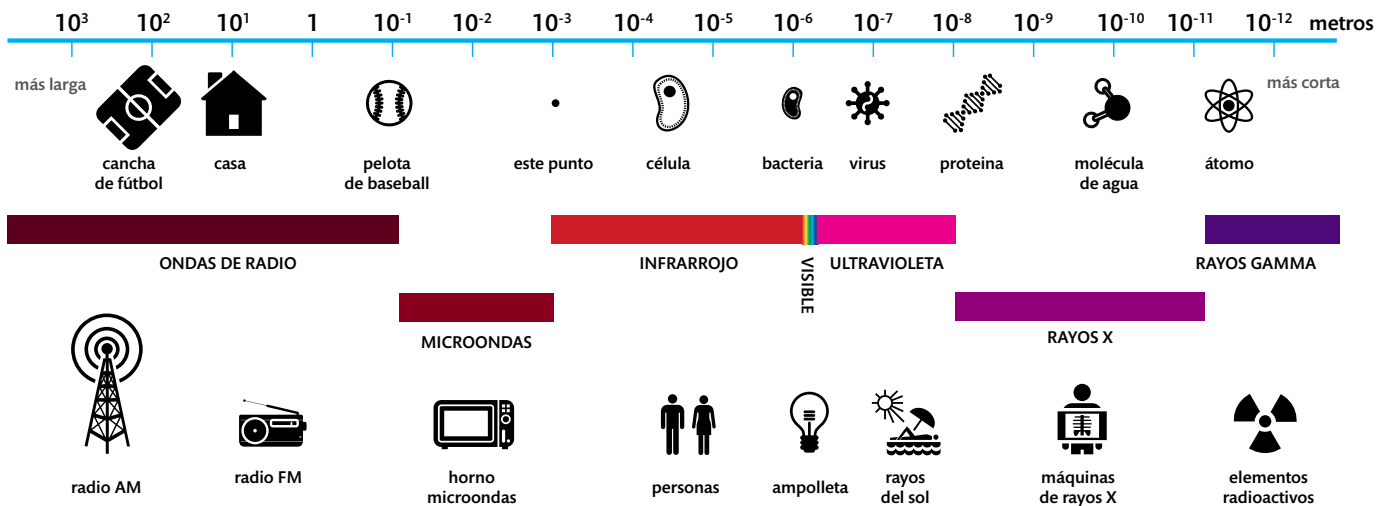
Imagen 12. Seis imágenes del mismo objeto realizadas con diferentes rangos de longitud de onda. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2.2 La radiación en nuestro día a día

A excepción de la luz visible, toda la radiación electromagnética es invisible e indetectable para nuestros ojos. Pero aunque no pueda verse, esta radiación es utilizada en nuestro día a día (ver Imagen 13): cuando escuchamos música en la radio (onda de radio), cuando calentamos comida en el microondas (microonda), cuando cambiamos el canal del televisor con un control remoto (onda infrarroja), cuando nos bronceamos bajo el sol (onda ultravioleta) y cuando nos sacamos una radiografía en el hospital (onda de rayos X).

La única radiación que no usamos comúnmente es la de rayos gamma, que se genera en procesos radiactivos y es dañina para nosotros debido a la gran cantidad de energía que porta, por su alta frecuencia (sabemos que a menor longitud de onda, mayor es la energía). Esta relación entre energía y frecuencia de un fotón fue descubierta por el físico alemán Max Planck, quien afirma que la energía no puede ser ni emitida ni absorbida de forma continua, sino que lo hace en [cuantos](#) o "paquetes de energía".

Imagen 13. Espectro electromagnético, usos y órdenes de magnitud.

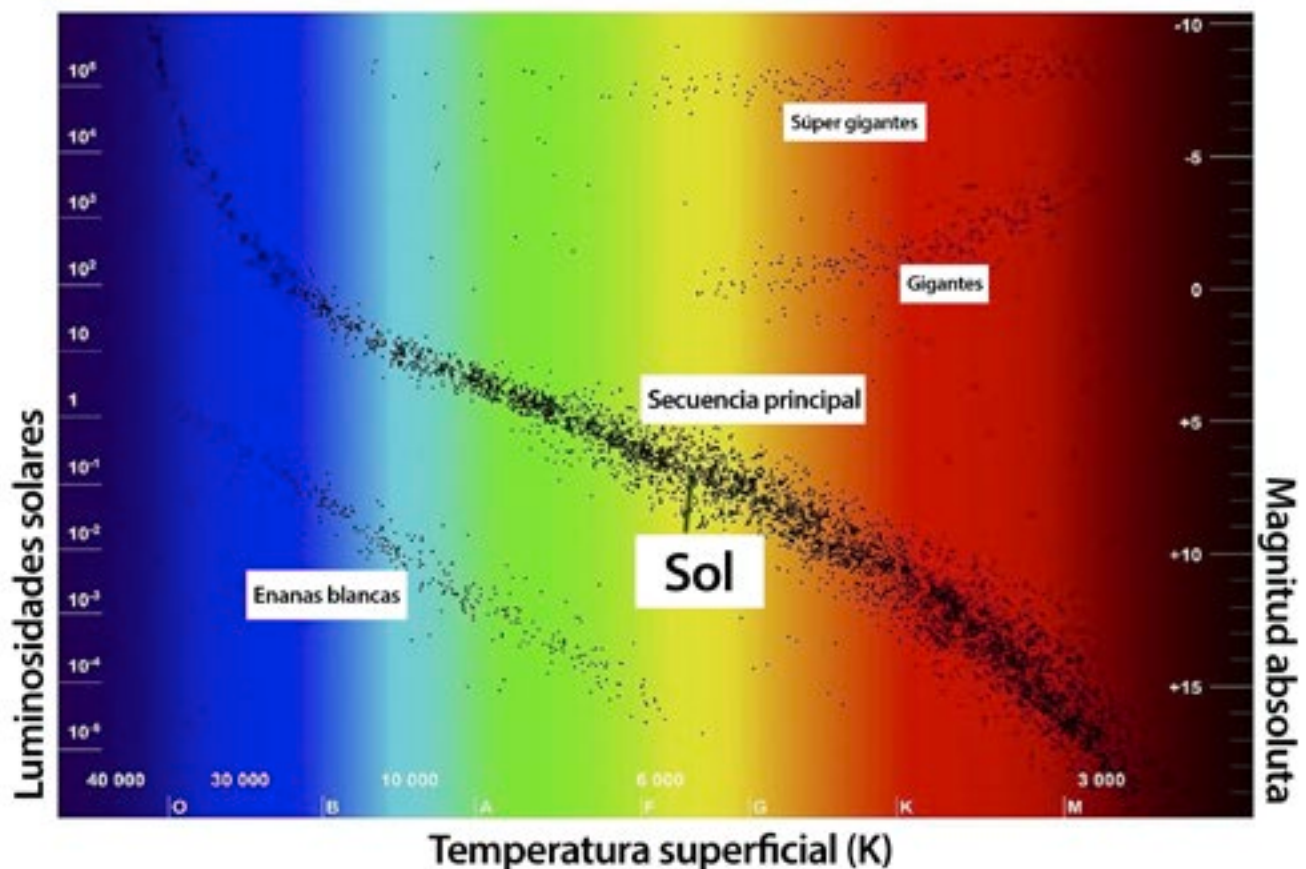


2.3 Origen de la radiación electromagnética

La [radiación electromagnética](#) puede ser generada en diversos procesos físicos, por lo que su estudio entrega información importante acerca de la fuente que la genera. Por ejemplo, los objetos fríos que se encuentran en el espacio irradian luz invisible bajo el extremo rojo del espectro, y lo hacen en menor cantidad que los objetos calientes como las estrellas. La luz visible puede ser generada en diversos procesos y su longitud de onda determina su color. Los colores que podemos ver con nuestros ojos tienen longitudes de onda de entre 400 y 700 [nanómetros](#), partiendo por la luz azul y llegando a la luz roja. La radiación cuyas longitudes de onda pertenecen a este rango se llama radiación óptica, conocida comúnmente como luz normal o luz visible. Las radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda inferiores a 400 nanómetros o superiores a 700 nanómetros son invisibles para el ojo humano.

El [diagrama de Hertzsprung–Russell](#) (imagen 14), resume muchos de los conocimientos que tenemos hoy de las estrellas. Una de las cosas que podemos apreciar es justamente la relación entre la temperatura y el color de una estrella: así la superficie del Sol, con 5.778 [Kelvin](#) (5.505°C) de temperatura, brilla más intensamente en aquellas longitudes de onda que nuestros ojos ven o interpretan como color amarillo-verdoso, y que corresponde a unos 502 nanómetros. Las estrellas más frías se ven más rojas y las más calientes, azules.

Imagen 14.
Diagrama de Hertzsprung–Russell



2.3.1 Radiación térmica

Uno de los procesos más comunes en los que se genera radiación electromagnética, es la radiación térmica, la que se percibe fácilmente al acercar la mano a un objeto caliente o cuando se observa un hierro incandescente brillando en la oscuridad. Esta radiación no la podemos ver a simple vista, pero sí usando una cámara infrarroja (ver Imagen 15).



Para explicar este proceso, en 1862 el físico Gustav Kirchhoff introdujo un objeto teórico o ideal al que llamó cuerpo negro. Este cuerpo se caracteriza por absorber toda la luz y energía radiante que incide sobre él, sin que nada de esta radiación incidente se refleje o pase a través del cuerpo negro.

Imagen 15. Dos fotografías de la misma persona tomada con una cámara normal (izq.) y con una cámara infrarroja (der.). Crédito: NASA/IPAC.

Aún cuando el cuerpo negro es un objeto ideal, puede ser útil una analogía para imaginarlo de mejor forma: supongamos que se tiene una esfera metálica hueca, cuya pared interior esta muy bruñida. Supongamos que se le hace un agujero pequeño que cruza su superficie. Es fácil imaginar un rayo de luz que entra y se refleja sucesivamente en el interior, es decir, que toda la luz que ingresa por ese agujero se refleja en el interior indefinidamente sin poder salir (ver Imagen 16). El cuerpo negro no debe confundirse con un agujero negro, que es otro objeto teórico.

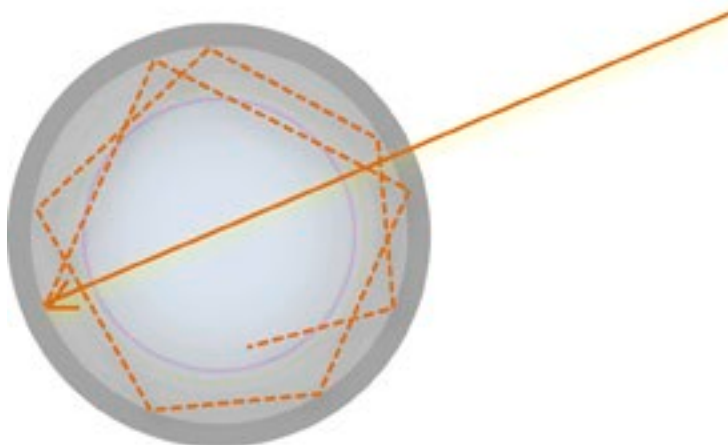


Imagen 16. Una forma para imaginar un cuerpo negro: El rayo de luz ingresa a la esfera y se refleja indefinidamente.

Aunque se llama cuerpo negro, no significa que sea oscuro, al contrario, emite luz y esta radiación recibe el nombre de **radiación de cuerpo negro**. El cuerpo negro emite radiación de diferentes longitudes de onda, en un continuo, como se observa en la Imagen 17.

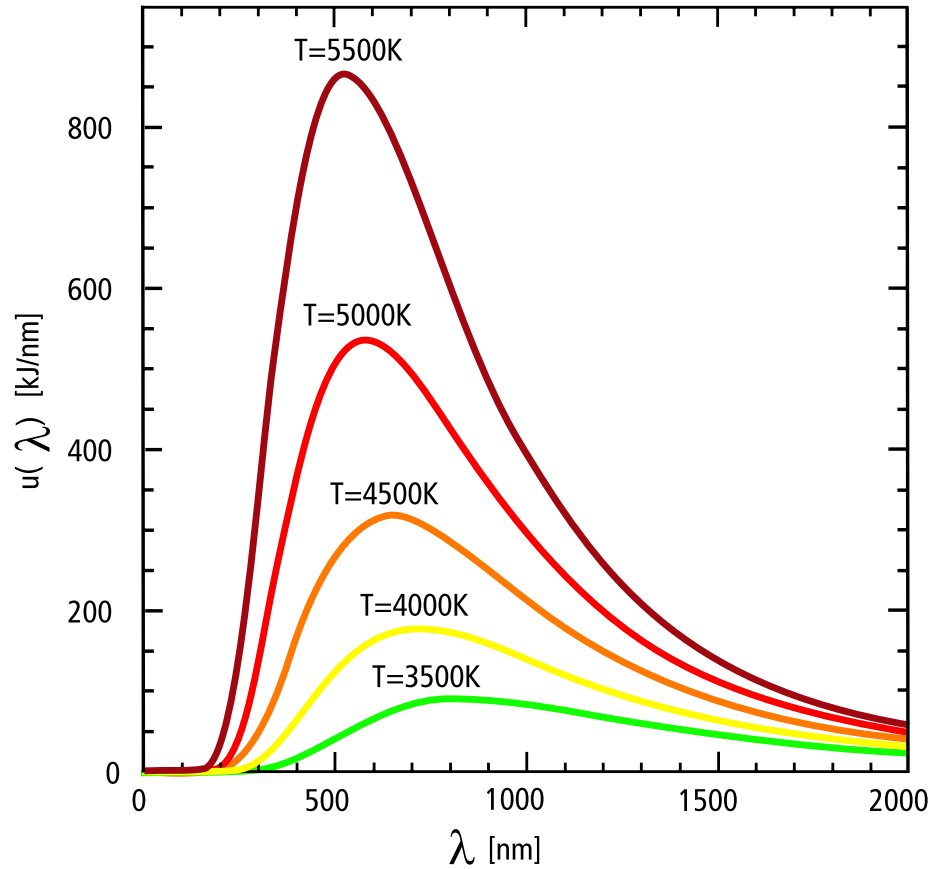


Imagen 17. Gráfico de la radiación de un cuerpo negro donde se observan varias curvas y las temperaturas a la que se encuentra el cuerpo negro (3.500 K = 3.227 °C). Se observa además que hay un máximo de emisión, por ejemplo a 5.500 K el máximo se encuentra en la longitud de onda de 500 nanómetros (1 nm = 10^{-9} m). Crédito: Wikipedia GPL.

A medida que la temperatura del cuerpo negro aumenta, debido a la energía que absorbe, el punto de máxima emisión se desplaza hacia longitudes de onda más pequeñas en su espectro. Por ejemplo, al observar el gráfico de la Imagen 17 se observa que a 3.500 K la longitud de onda máxima es casi 800 nm, si la temperatura aumenta a 4.000 K, la longitud donde ocurre el máximo de emisión cambia a 700 nm. Si recordamos que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia (ν), conforme la longitud disminuye, la frecuencia aumenta, por lo que se mueve desde el infrarrojo al visible.

Esto explica por qué un trozo de metal toma un color rojo incandescente (predominantemente longitudes de onda en torno al rojo) cuando comienza a calentarse, y si la temperatura continúa aumentando, se vuelve de color blanco (longitudes de onda en la mitad del rango visible).

La radiación de cuerpo negro tiene un espectro característico, que depende solamente de la temperatura del objeto. Varios objetos astronómicos irradian con un espectro que se aproxima al de un cuerpo negro, a una temperatura específica.

Relación entre temperatura y longitud de onda

La longitud de onda de emisión máxima, $\lambda_{m\acute{a}x}$ de la distribución de un cuerpo negro en función de la temperatura T , está dada por la [Ley de desplazamiento de Wien](#):

$$\lambda_{m\acute{a}x} = bT$$
$$(b = 2.897769 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K})$$

donde b es conocida como la constante de desplazamiento de Wien.

Relación entre la energía emitida y la temperatura

De la misma forma, la energía total emitida cada segundo por una sección del objeto aumentará proporcionalmente con la cuarta potencia de la temperatura del objeto. Esta relación se conoce como la [Ley de Stefan-Boltzmann](#).

$$E = \sigma T^4$$

donde T es la temperatura efectiva, o sea, la temperatura absoluta de la superficie (medida en Kelvin) y σ es la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \text{ K}^4)$.

En resumen, la radiación térmica se caracteriza por:

- Los objetos más calientes emiten luz a longitudes de onda más cortas y frecuencias más altas.
- Los objetos más calientes emiten luz más brillante.

Así, la luz que viene de vastas nubes frías en el espacio interestelar, a temperaturas de sólo unas pocas decenas de grados Kelvin sobre el cero absoluto, y desde algunas de las galaxias más tempranas y distantes de nuestro Universo, tendrán longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, que las sitúan entre la luz infrarroja y las ondas de radio en el espectro electromagnético, justamente en las que observa ALMA.

Los astrónomos pueden usar esta radiación para estudiar las condiciones químicas y físicas en nubes moleculares, que son densas regiones de gas y polvo donde nuevas estrellas están comenzando a nacer. A menudo estas regiones del Universo son oscuras a la luz visible, pero brillan intensamente en la parte milimétrica y submilimétrica del espectro.

2.3.2 Radiación no térmica

Existen otros mecanismos que generan radiación, que no se encuentran asociados a la temperatura del objeto. No se profundizará en ellos, pero se presentan a modo de referencia:

Mucha de la radiación de nuestra galaxia y en particular la radiación que descubriera Jansky, se genera principalmente por la interacción de partículas cargadas con campos magnéticos.

Cuando una partícula cargada, que tiene una velocidad determinada, entra en un campo magnético, sufre una fuerza que la desvía en una trayectoria circular, conocida como [fuerza de Lorentz](#). Como la partícula se encuentra acelerada, emite radiación, que bajo condiciones no relativistas -es decir, su velocidad es mucho menor que la velocidad de la luz- se conoce como radiación de ciclotrón. Pero cuando su velocidad se acerca a la de la luz emite una radiación mucho más fuerte, llamada radiación de sincrotrón. Un ejemplo de esto son los cuásares, que emiten radiación de sincrotrón además de luz visible y rayos X.

Una importante diferencia entre estos mecanismos es que, mientras la intensidad de la radiación térmica aumenta con la frecuencia, la intensidad de la radiación no térmica usualmente disminuye con la frecuencia.

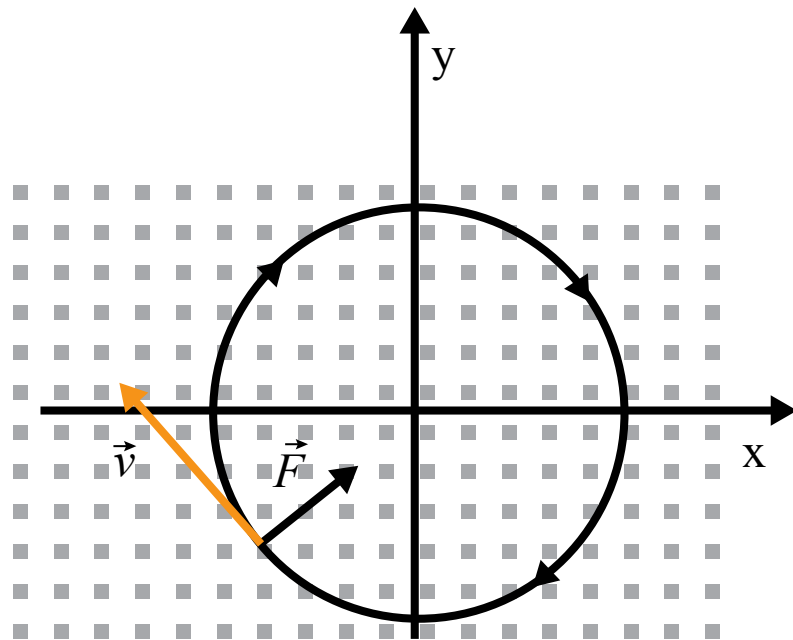


Imagen 18.
Partícula cargada en un campo magnético que sale del plano de la hoja. El campo magnético genera una fuerza que es siempre perpendicular al plano formado por el vector velocidad y el vector del campo magnético. Crédito: Pablo Torres.

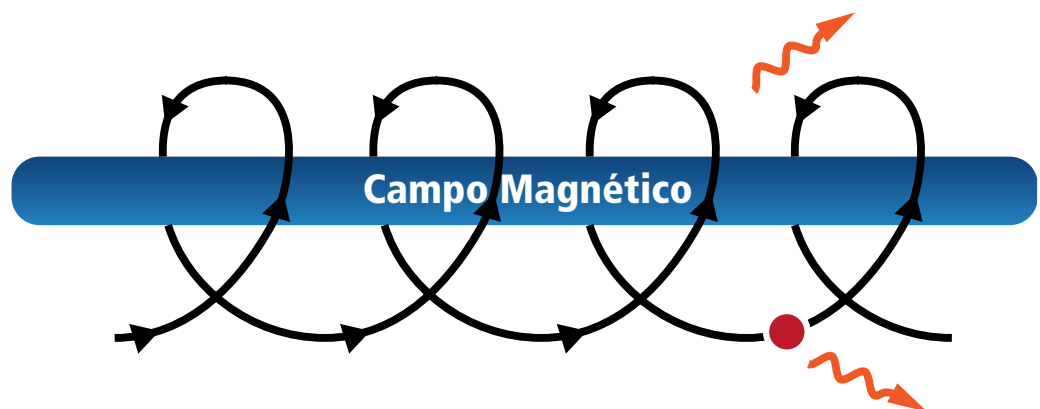


Imagen 19.
Partícula que se mueve en el campo magnético y que al estar acelerada genera radiación de ciclotrón. Crédito: NRAO

2.4 El viaje de las ondas por el espacio

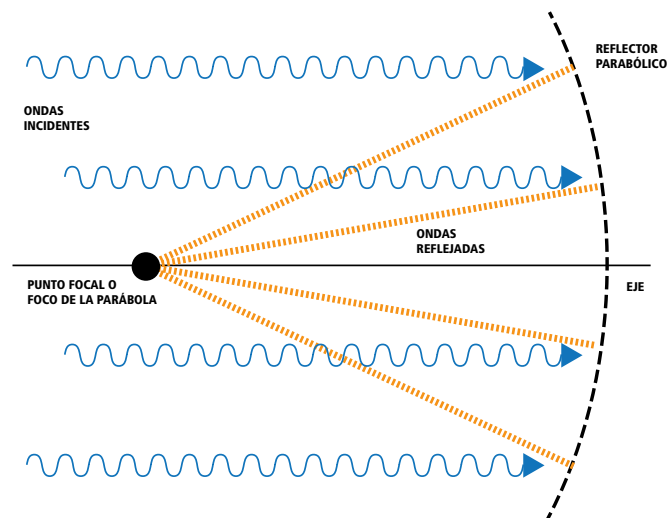
Cuando las ondas electromagnéticas son emitidas, viajan por el espacio en línea recta. En su camino pueden encontrar distintas sustancias químicas, como aquellas que se encuentran en nubes de polvo o gas y con las que interactúan de diferentes formas: pueden ser absorbidas, reflejadas o pasar directamente a través de ellas sin sufrir mayores cambios.

Cuando una onda se enfrenta a un cambio de medio pueden observarse los siguientes fenómenos:

2.4.1 Reflexión

La reflexión ocurre cuando las ondas cambian de dirección luego de chocar con una superficie (ver Imagen 20). Este fenómeno se observa claramente en un espejo, donde las ondas luminosas cambian la dirección de su movimiento. Similar fenómeno es usado en los telescopios reflectores, donde un espejo de forma parabólica desvía la luz incidente, paralela al eje óptico, hacia un mismo punto llamado foco. En el caso de las antenas de un radiotelescopio, éstas concentran las ondas electromagnéticas incidentes en el receptor.

Imagen 20



2.4.2 Refracción

La refracción se produce cuando las ondas atraviesan o pasan de un medio material a otro, y experimentan un cambio en su dirección y velocidad de propagación. La variación de estos parámetros dependerá del índice de refracción de los medios materiales involucrados. Este fenómeno se observa cuando la luz atraviesa el agua o cuando pasa por una lente de vidrio (ver Imagen 21).

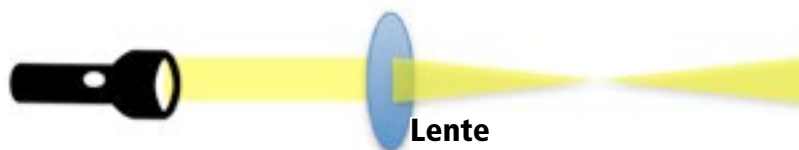


Imagen 21

2.4.3 Difracción

La difracción es un fenómeno característico de las ondas, consistente en la desviación de éstas al encontrarse con obstáculos o pasar por rendijas (ver Imagen 22). Lo experimentamos en el día a día cuando escuchamos sonidos que son generados en habitaciones contiguas. También puede observarse en el caso de una radiofuerza que es ocultada por la Luna, a través de oscilaciones en su brillo, en vez de desaparecer abruptamente.

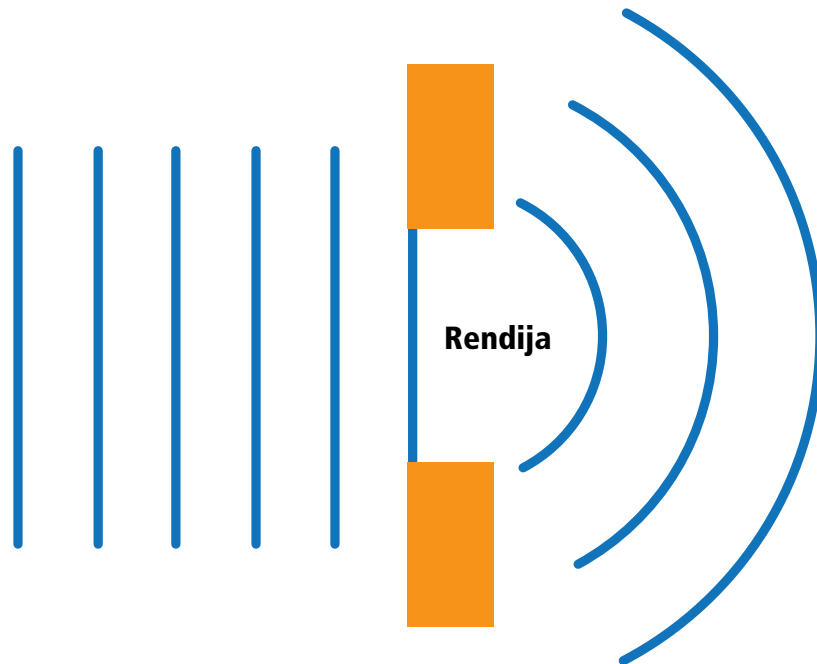


Imagen 22

Este fenómeno depende de la relación entre la longitud de onda y el tamaño del objeto, razón por la cual no parece observarse en la luz visible, ya que la longitud de onda de la luz es muy pequeña. Para observar esto se requiere de una rendija cuyo tamaño sea del orden de la longitud de onda, por ejemplo, para luz verde tendría que tener una separación de 5500 nanómetros. Este fenómeno se observa en los telescopios reflectores, en la que la difracción en los brazos que soportan el espejo secundario pueden alterar las imágenes de las estrellas.

Las desviaciones de las ondas electromagnéticas ocasionadas por la difracción al enfrentar un espejo, el disco de una antena o una lente, crean un límite fundamental en los detalles finos que pueden ser detectados por el telescopio, lo que se conoce como poder de resolución.

En el caso de un telescopio, óptico o de radio, la resolución depende del diámetro de su espejo primario o del disco, respectivamente, y de la longitud de la onda que está observando. Por ejemplo, si el disco de una antena tiene un diámetro D medido en metros, y opera en una longitud de onda λ , también medida en metros, entonces su resolución máxima expresada como el ángulo θ (en [radianes](#)) es aproximadamente:

$$\theta \approx \lambda/D$$

En la ecuación anterior, el ángulo θ está medido en radianes, en lugar de grados. Hay 2π radianes en una circunferencia, en contraposición a los 360 grados usuales. Por lo tanto, para hacer una conversión de radianes a grados, se debe multiplicar por $360/2\pi$. Como se observa en la expresión, el radián no es una unidad de medida como lo es el metro o el segundo.

Los astrónomos a menudo miden ángulos más pequeños que un grado, ya sea en arcminutos o arcosegundos. También se pueden usar los términos minutos de arco o segundos de arco. Hay 60 arcminutos en un grado, y 60 arcosegundos en un arcminuto (por tanto, 3.600 arcosegundos en un grado).

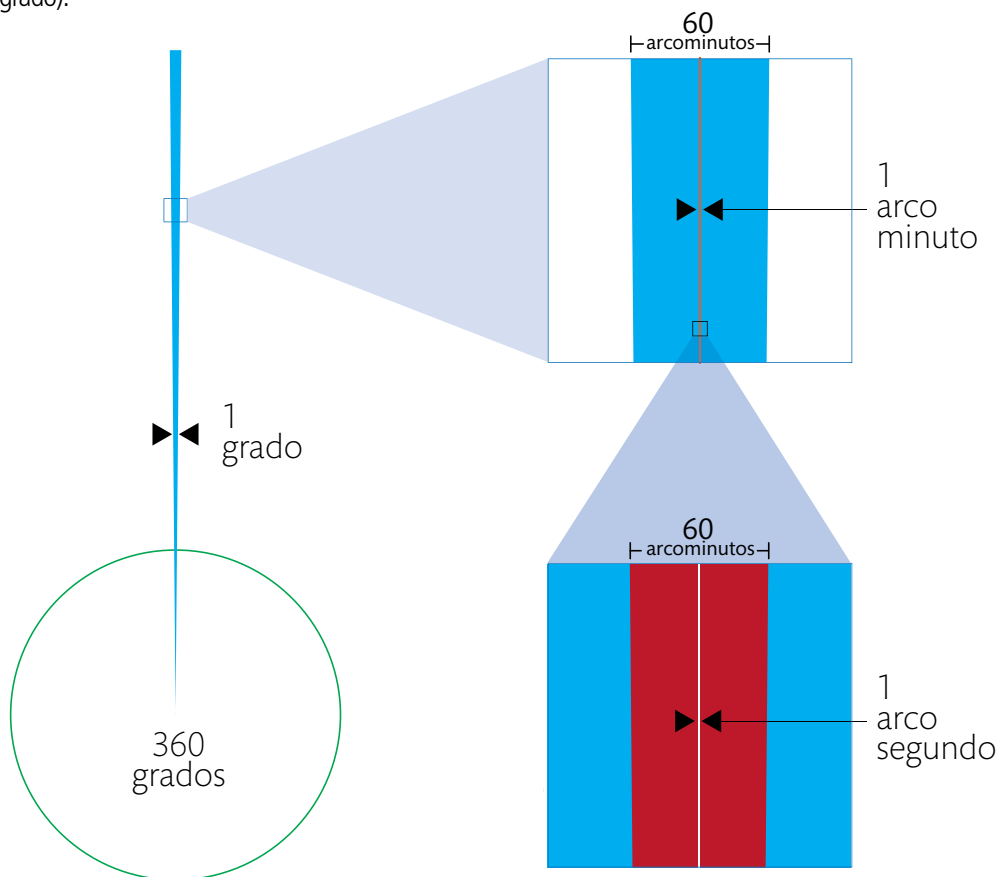


Imagen 23. Relación entre ángulo, arcminuto y arcosegundo. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), A. Peredo.

Cuando nos referimos a distancias relativamente grandes con respecto al tamaño del objeto observado, podemos utilizar una relación simple que nos permite hacer la conversión entre ángulos y distancias. Así, si los lados del ángulo definido pueden considerarse iguales a la distancia al objeto y mucho mayores que el arco subtendido (x), entonces podemos aplicar la aproximación para ángulos pequeños, esto es:

$$x \approx r \theta$$

donde θ es el ángulo (expresado en radianes) que subtende el arco de longitud x a una distancia r .

2.4.4 Resolución en longitudes de onda de ALMA

Apliquemos ahora estos resultados a ALMA, que observa el Universo en longitudes de onda de alrededor de 1 mm, en comparación a la luz visible que tiene alrededor de 500nm:

$$\theta \approx \lambda/D$$

Para el radio telescopio:

$$\theta \approx 1 \times 10^{-3} \text{ m} / 12 \text{ m} \approx 10^{-4} \text{ rad} \approx 0,057^\circ$$

Para un telescopio óptico de igual tamaño:

$$\theta \approx 5 \times 10^{-9} \text{ m} / 12 \text{ m} \approx 10^{-10} \text{ rad} \approx 2,4 \times 10^{-7}^\circ$$

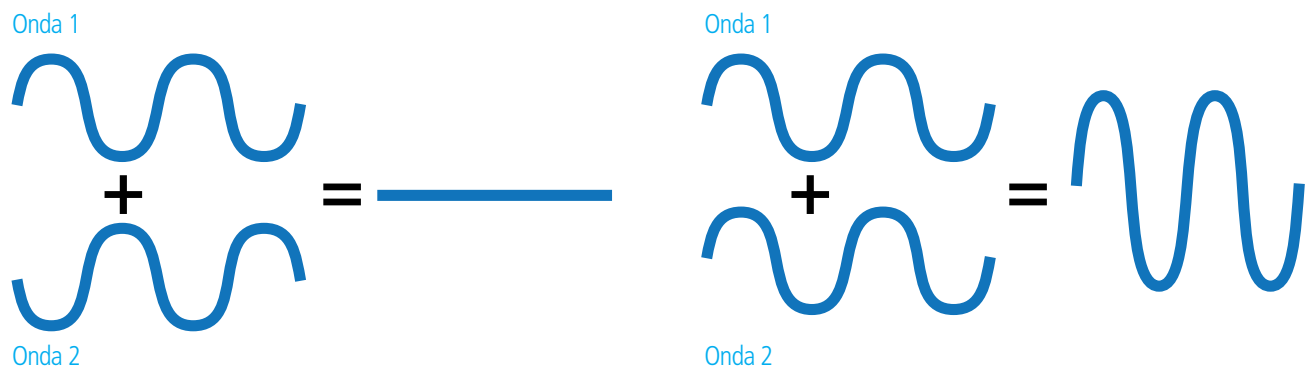
Los resultados muestran que el poder de resolución es menor para las ondas de radio que en el espectro visible. Es por esto que los telescopios de onda milimétrica y submilimétrica, como ALMA, deben ser aún más grandes que los telescopios de luz visible para poder ser capaces de captar estas longitudes de onda. Además es necesario utilizar la técnica de interferencia.

2.4.5 Interferencia

Se habla de interferencia cuando se capta una señal de radio no deseada, como cuando un radiotelescopio capta una señal de radio generada por la actividad humana, en vez de la generada por fuentes naturales.

Un segundo sentido, aplicado a un fenómeno propio de las ondas, consiste en la combinación de dos o más ondas en el mismo punto del espacio, dando como resultado una mayor intensidad, (interferencia constructiva) o una disminución de la misma (interferencia destructiva). Para que ocurra, las ondas deben ser coherentes, es decir, sus crestas y valles deben estar en fase. La interferencia destructiva ocurre cuando a un punto del espacio se superpone un valle con una cresta, mientras que la constructiva ocurre cuando coinciden las crestas o los valles.

Imagen 24. Interferencia destructiva y constructiva. En la imagen de la izquierda la cresta de la onda 1 coincide con el valle de la onda 2. En la imagen de la derecha la cresta de la onda 1 coincide con la cresta de la onda 2. Crédito: astro-canada.ca.



Este mismo principio es utilizado en la técnica conocida como Interferometría, donde múltiples telescopios individuales pueden ser vinculados unos con otros y sus señales combinadas para simular el efecto de un solo telescopio gigante.

La resolución de un interferómetro no depende del diámetro de los reflectores individuales, sino de la separación máxima entre las antenas, o líneas de base, por lo que al alejarlas se incrementa la resolución. Las señales de las antenas se combinan y se procesan en una súper computadora —el Correlacionador de ALMA— para simular el trabajo de un telescopio individual. En otras palabras, un interferómetro funciona como un telescopio del tamaño del conjunto entero de antenas.

Al aumentar la distancia entre las antenas se aumenta el poder de resolución del interferómetro, lo que le permite captar detalles más sutiles. La posibilidad de combinar las señales de antenas separadas por líneas de base de varios kilómetros es crucial para obtener una resolución extremadamente fina y lograr imágenes muy detalladas.

El conjunto principal de ALMA tiene 50 antenas de 12 metros de diámetro dispuestas en configuraciones específicas con separaciones que van desde 150 metros a 16 kilómetros entre las antenas más distantes. De esa forma, el conjunto simulará un telescopio gigante, mucho más grande que cualquier telescopio de un solo reflector que se pueda construir.

Otras cuatro antenas de 12 metros de diámetro y doce antenas de 7 metros conforman el Conjunto Compacto de Atacama (ACA, en su sigla en inglés), conocido como conjunto Morita. Las antenas de 7 metros podrán concentrarse en un área más pequeña sin interferir unas con otras. Debido a la forma en que funcionan los interferómetros, esta disposición les permitirá obtener una imagen más general de los objetos astronómicos que se observen, tal como lo hace el lente gran angular de una cámara fotográfica. Por otro lado, las cuatro antenas de 12 metros del ACA se utilizarán por separado para medir el brillo absoluto de los objetos observados, un nivel que no se puede medir con un interferómetro.

Así, las distintas configuraciones del radiotelescopio permitirán a los astrónomos estudiar tanto la estructura general de una fuente astronómica como sus detalles más pequeños. Sin embargo, para pasar de una configuración compacta a una amplia hay que desplazar las antenas. Esto se logra con camiones transportadores hechos a medida, capaces de levantar las antenas (que pesan más de 100 toneladas) y trasladarlas por varios kilómetros en la cordillera del desierto de Atacama para luego colocarlas sobre plataformas de concreto con precisión milimétrica.

2.4.6 Transparencia y opacidad

La luz emitida por las estrellas u otros objetos en el espacio, tiene que atravesar distintas zonas para llegar a la Tierra. Su capacidad para avanzar a través de regiones que presentan distintos grados de transparencia dependerá de la longitud de onda. Así por ejemplo, la luz visible puede ser obstruida por una nube de polvo, mientras que otras radiaciones son capaces de traspasarla sin perder energía.

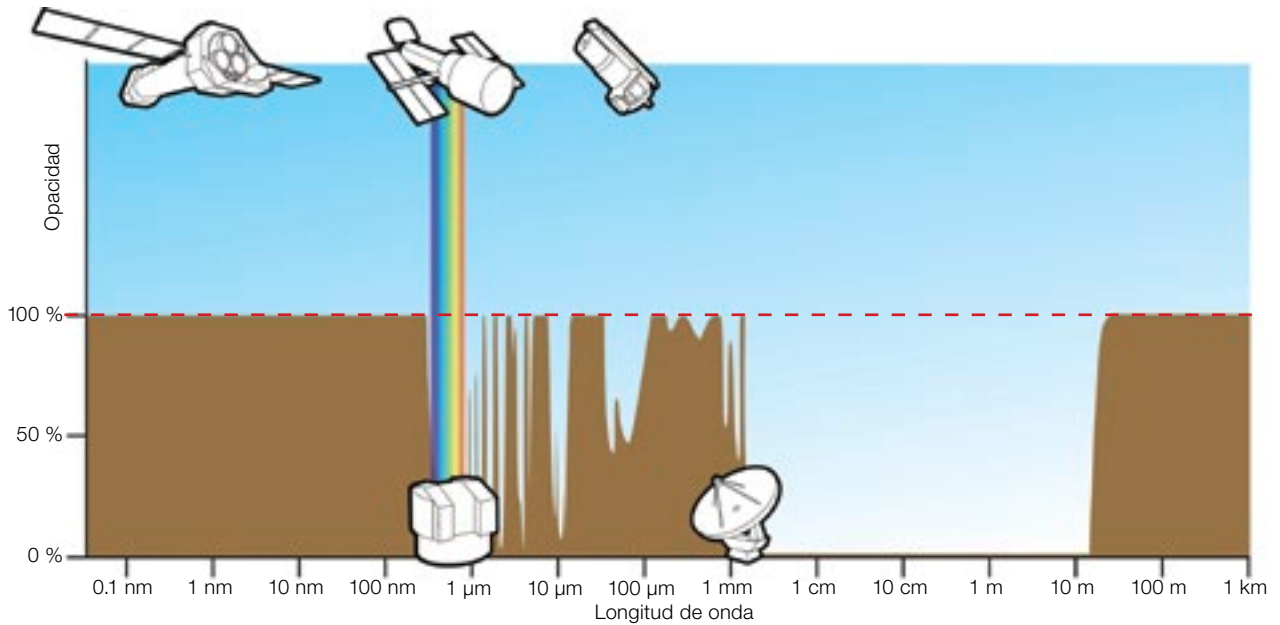


Imagen 25. Opacidad de la atmósfera. En el eje vertical se presenta la opacidad y en el horizontal, las longitudes de onda. La línea horizontal máxima (roja) corresponde a 100% de opacidad. Para la luz visible, marcada con el arcoiris, la atmósfera es transparente, lo mismo que con gran parte de las ondas de radio. Crédito: ESA/Hubble (F. Granato)

Lo mismo ocurre cuando la luz llega a la atmósfera terrestre, lo que se define como transparencia u opacidad atmosférica. Una opacidad del 100% corresponde a una transparencia del 0% y viceversa. La imagen 25 muestra cómo la opacidad de la atmósfera varía con respecto a la longitud de onda. A una opacidad del 100%, la radiación es bloqueada completamente, mientras que a una opacidad del 0%, la radiación es transmitida por completo (lo que los astrónomos denominan como "ventana de observación").

La atmósfera no sólo absorbe las débiles señales del espacio que los astrónomos buscan captar con ALMA, sino que también emite radiación por sí misma. El factor principal que define la transparencia, en el caso de las longitudes de onda en que observa ALMA, es el vapor de agua. Es por esto que es tan importante ubicarse en un sitio alto y seco. Y es por ello también que tras analizar diversos sitios en el planeta, el consorcio a cargo de construir ALMA escogió el llano de Chajnantor, a 5.000 metros de altitud y frente al desierto de Atacama, en el norte de Chile. Justamente un sitio muy alto y muy seco.

La cantidad de vapor de agua es generalmente medida en milímetros de "vapor de agua precipitable" (pwv, por su sigla en inglés), que corresponde a la profundidad del charco que se formaría sobre un lugar si toda el agua se precipitara en forma de lluvia. El valor promedio en el planeta es cercano a los 2,5 cm, pero para la astronomía submilimétrica se necesitan condiciones de sequedad extrema. En Chajnantor, durante el periodo comprendido entre abril y diciembre, el promedio de vapor de agua es de aproximadamente 1 mm, y puede descender a menos de 0,5 mm en condiciones de sequedad particulares. En la imagen 26 se observa como varía la opacidad con la longitud de onda y la presencia de vapor de agua en la atmósfera.

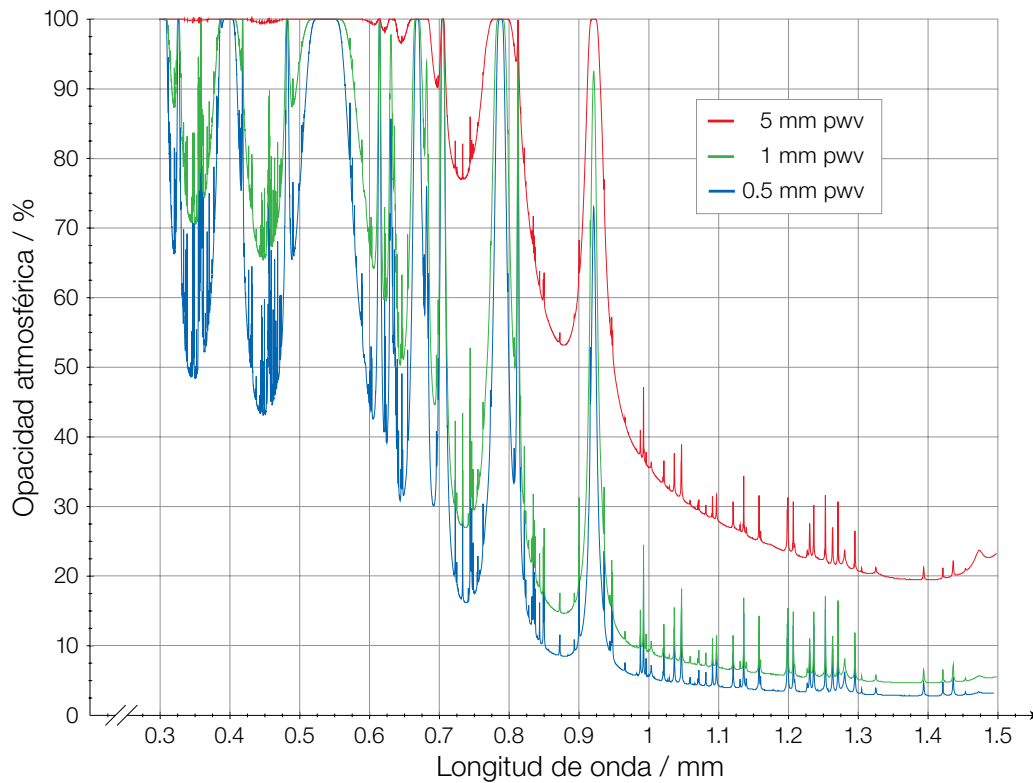


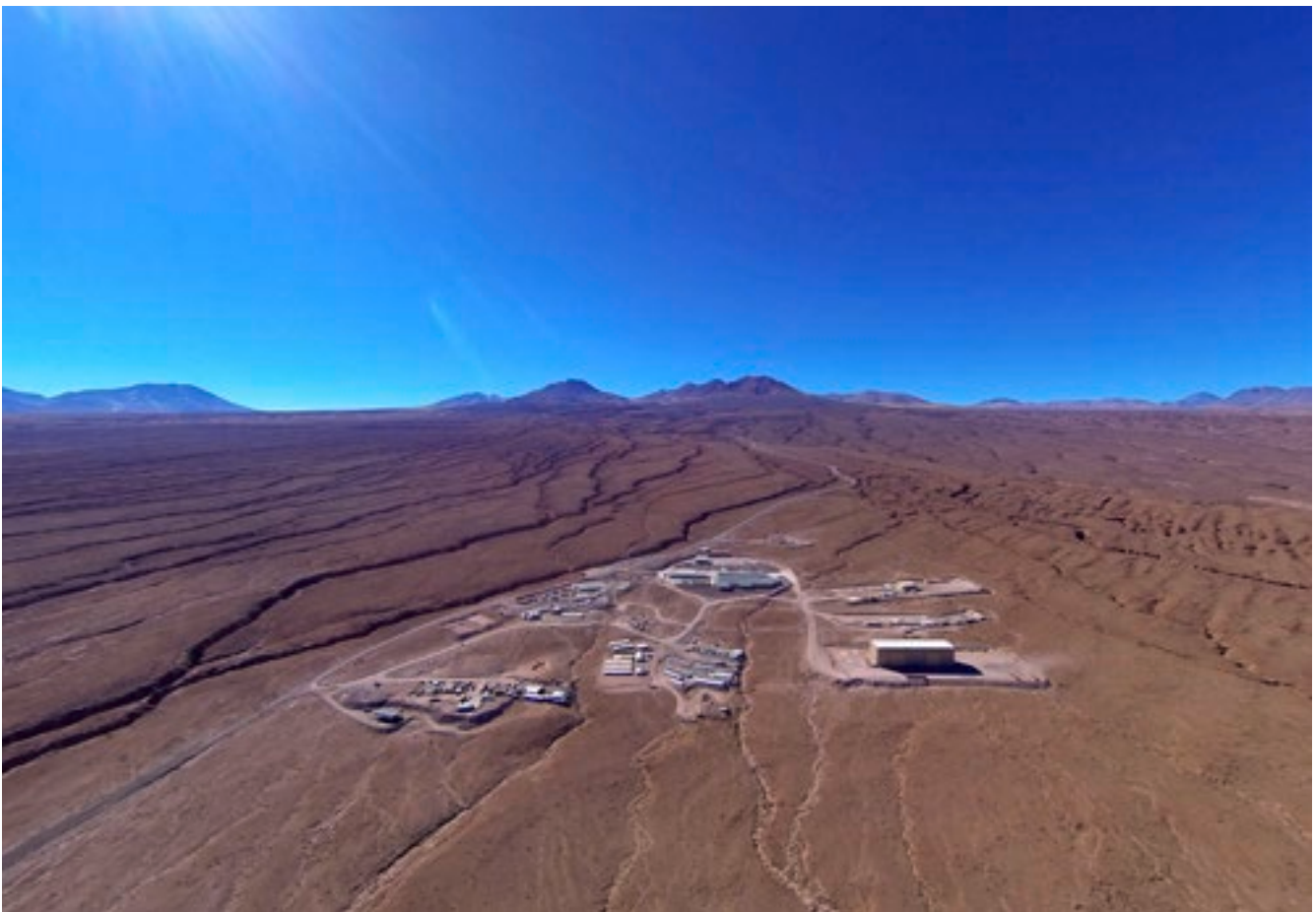
Imagen 26. Diagrama de opacidad atmosférica según longitud de onda, donde las líneas de diferentes colores representan diferentes niveles de vapor de agua precipitable. Crédito: ESO/APEX

2.5 Trabajando a gran altitud

El sitio final de las antenas de ALMA es conocido como Sitio de Operaciones del Conjunto (AOS, por su sigla en inglés). A una altitud de 5.000 metros, las condiciones pueden ser excelentes para la astronomía submilimétrica, pero son bastante duras para vivir y trabajar. Debido a esto, las operaciones cotidianas son conducidas desde las instalaciones del Centro de Apoyo a las Operaciones (OSF, por su sigla en inglés), a 2.900 metros de altitud.

Imagen 27. Centro de Apoyo a las Operaciones de ALMA.
Crédito: Ariel Marinkovic / X-Cam

A grandes alturas la presión atmosférica es menor que la existente a nivel del mar, así como también lo es la cantidad de oxígeno disponible. En el ejercicio a continuación examinaremos cómo la presión atmosférica en ALMA se compara con la del nivel del mar y otros lugares ubicados a gran altitud.



2.5.1 Presión atmosférica con altura: la atmósfera isotérmica

Podemos utilizar un modelo simple para estudiar la forma en que la presión disminuye con la altitud, asumiendo que la presión cae exponencialmente al aumentar la altura. Este modelo es descrito como “isotérmico” ya que asumimos que la temperatura del aire permanece constante. Esto no es totalmente exacto, pero se trata de una aproximación razonable. En otras palabras,

$$p_h = p_0 e^{-\frac{h}{H}}$$

donde p es la presión como una función de la altura h sobre el nivel del mar. Hay dos constantes en la ecuación: p_0 es la presión a nivel del mar (es decir, $h = 0$ metros) y H es la altura donde la presión ha caído por un factor de $1/e$, y es conocida como la escala de altura de la atmósfera.

Imagen 28. Centro de Apoyo a las Operaciones de ALMA. Crédito: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO), Adhemar Duro



Autoevaluación

1. Para una onda electromagnética, ¿cuál es la relación entre frecuencia y longitud de onda?
2. Considerando la longitud de onda, ¿cuáles son las categorías del espectro electromagnético?
3. ¿Cuáles son las principales características de la radiación térmica?
4. ¿Cuál es la diferencia entre radiación ciclotrón y sincrotrón?
5. ¿Cómo se determina la resolución de un interferómetro?
6. ¿Cuál es el principal factor que influye en la opacidad de la atmósfera terrestre en el rango de onda milimétrico/submilimétrico?
7. ¿Cuáles son los riesgos de trabajar en el Sitio de Operaciones del Conjunto (AOS) de antenas de ALMA?

3. Explorando nuestros orígenes cósmicos



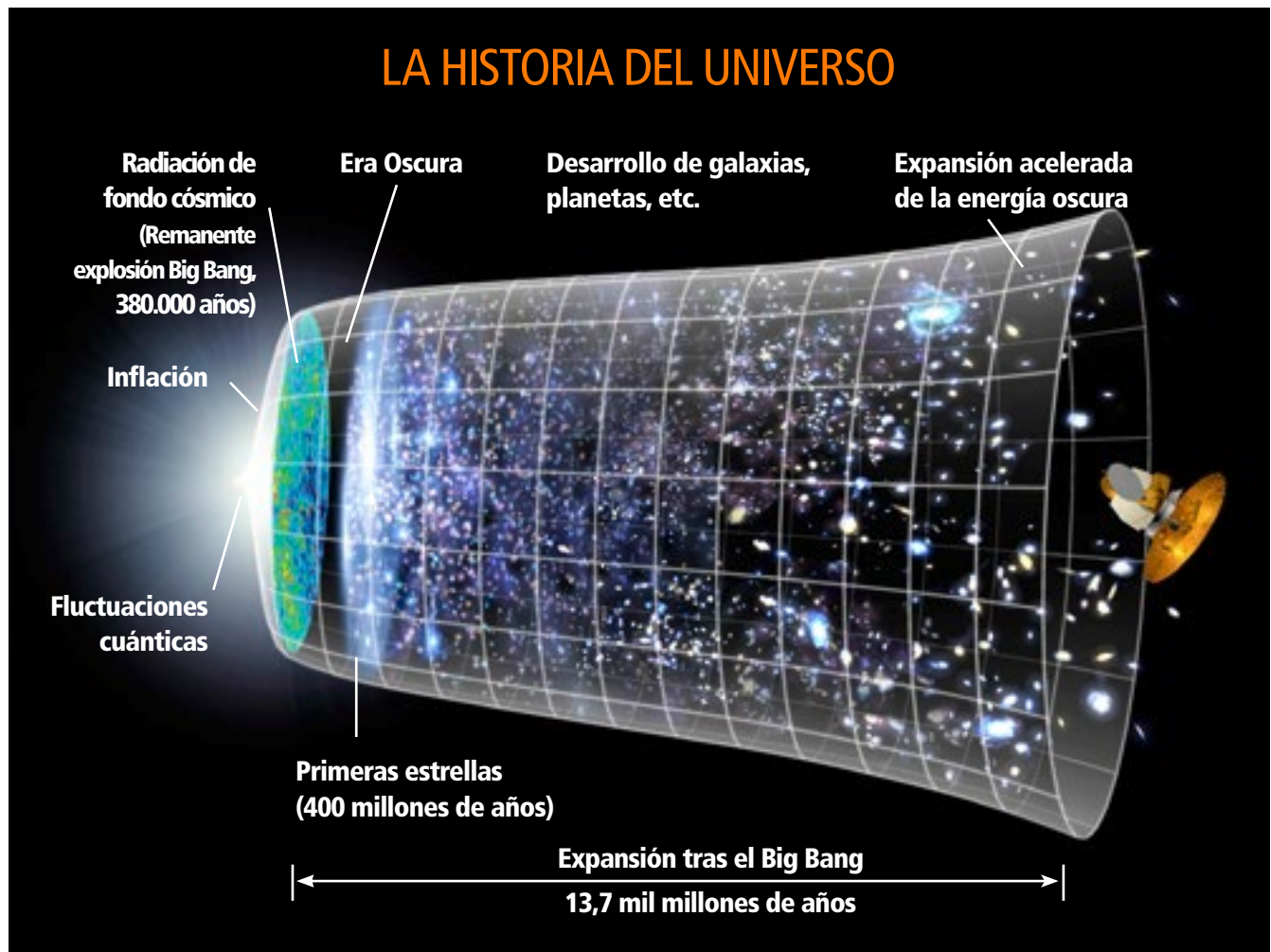
Antenas de ALMA. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

ALMA es el telescopio más poderoso para observar el Universo frío, tanto el gas molecular y el polvo como los vestigios de la radiación de la Gran Explosión o Big Bang. ALMA estudia los componentes básicos de las estrellas, sistemas planetarios, galaxias y de la vida misma. Al proporcionar a los científicos imágenes detalladas de estrellas y planetas naciendo en nubes de gas cercanas a nuestro Sistema Solar, y detectando galaxias distantes formándose en el borde del Universo observable, tal como ocurrió hace unos diez mil millones de años atrás, ALMA está permitiendo a los astrónomos abordar algunas de las preguntas más profundas de nuestros orígenes cósmicos.

3.1 El Big Bang

A medida que la luz del Big Bang se fue desvaneciendo, el Universo temprano se volvió más y más oscuro. No había estrellas, sólo gases —en su mayor parte hidrógeno, un poco de helio, trazos de litio y berilio— de los cuales finalmente se formarían las primeras estrellas. Nadie sabe con exactitud cuánto tiempo duró esta Edad Oscura, pero en algún momento durante los primeros cientos de millones de años, algunas estrellas se condensaron a partir de ese gas y comenzaron a brillar.

De acuerdo a la teoría, estas primeras estrellas tenían una masa mucho mayor y eran más luminosas que las actuales. Vivían sólo un millón de años antes de explotar espectacularmente, disparando al espacio los elementos químicos acumulados profundamente en sus centros.



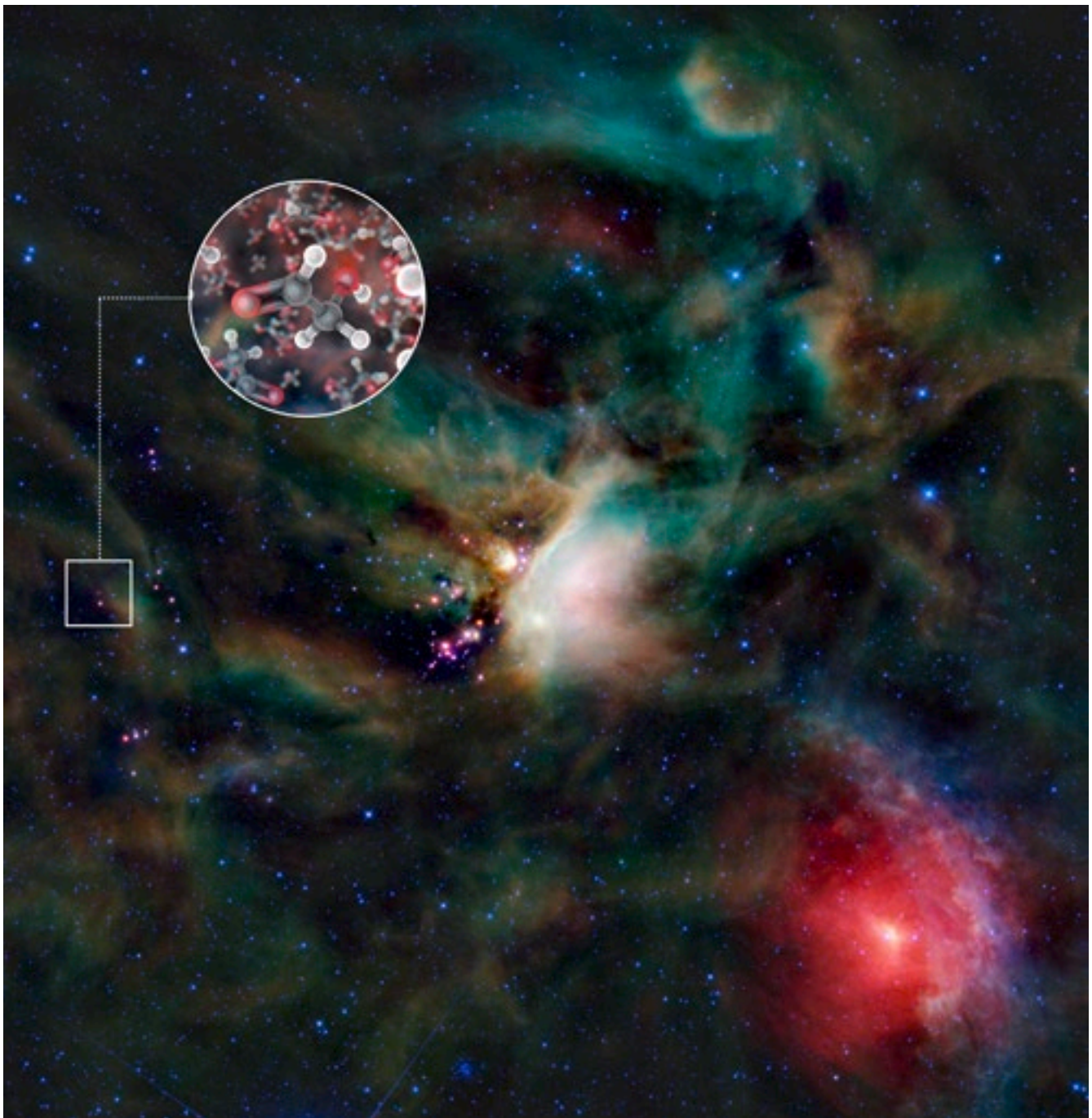
Incluso los telescopios más poderosos con que se cuenta hoy no pueden detectar la luz proveniente de estrellas individuales de esa primera generación. Los observatorios espaciales que vendrán serán técnicamente capaces de registrar la mayor cantidad de luz emitida por ese tipo de estrellas cuando explotan, pero las oportunidades de hacer algo así —incluso una vez— en el tiempo de vida de un observatorio, son escasas.

Imagen 29. Expansión del Universo desde el Big Bang. Crédito: NASA-WMAP.

Paradójicamente, nuestra mayor esperanza de detectar la era de las primeras estrellas radica en uno de los elementos más débiles del Universo. Entre el material expelido hacia el espacio por esas estrellas estaba el polvo formado de la fusión termonuclear de elementos más livianos contenidos en éstas. Así, las primeras apariciones de polvo se convierten en nuestra mejor evidencia sobre la vida y muerte de las primeras estrellas.

Imagen 30. Moléculas de Glicolaldehído rodeando la estrella IRAS 16293-2422. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

ALMA está diseñado para detectar polvo en el Universo temprano. Al escudriñar el espacio en profundidad —recordemos que cuanto más lejos vemos, más retrocedemos en el tiempo—, ALMA detecta el brillo del polvo tibio presente en las galaxias más lejanas y por lo tanto más antiguas, mucho más de lo que podríamos captar en las observaciones en luz visible o infrarroja.



3.2 La química del Universo

A nivel microscópico, los paisajes del espacio muestran verdaderas fábricas químicas de increíble complejidad. Los elementos químicos se unen para formar moléculas, un proceso continuo y que se diversifica, pues al calentarse las moléculas se liberan del polvo, convirtiéndose en moléculas gaseosas en el espacio, como se aprecia en la imagen 30. Estas moléculas constituyen los pilares fundamentales de la vida y proveen de alimento a los planetas jóvenes.

Si los elementos químicos fuesen letras del alfabeto, las moléculas serían las palabras. Estas últimas son más diversas, complejas e interesantes que las primeras, sin embargo, las moléculas no sobreviven bien a las altas temperaturas (miles de grados) a las que están sintonizados los telescopios de luz visible. Es necesaria entonces la tecnología de los radiotelescopios como ALMA para observarlas.

ALMA tiene una habilidad sin precedentes para descubrir y medir la presencia de moléculas y su distribución en el espacio. Esto está permitiendo grandes avances en la comprensión de la química del espacio – irreproducible en laboratorios en la Tierra– y las cambiantes condiciones que la afectan. Por ejemplo, astrónomos utilizando ALMA ya han detectado moléculas de azúcar en el gas que rodea a una estrella joven similar al Sol (imagen 30). Esta es la primera vez que se encuentra azúcar en el espacio alrededor de una estrella como esa, y su hallazgo demuestra que los componentes básicos de la vida se encuentran en el lugar y el momento correctos para incorporarse a los planetas que se forman cerca de la estrella.

Otro ejemplo son las observaciones de moléculas de monóxido de carbono, que han revelado una estructura espiral totalmente inesperada en el material que rodea a la antigua estrella R Sculptoris (imagen 31). Es la primera vez que se encuentra una estructura como ésta y probablemente es producida por una estrella compañera oculta que orbita la estrella principal.

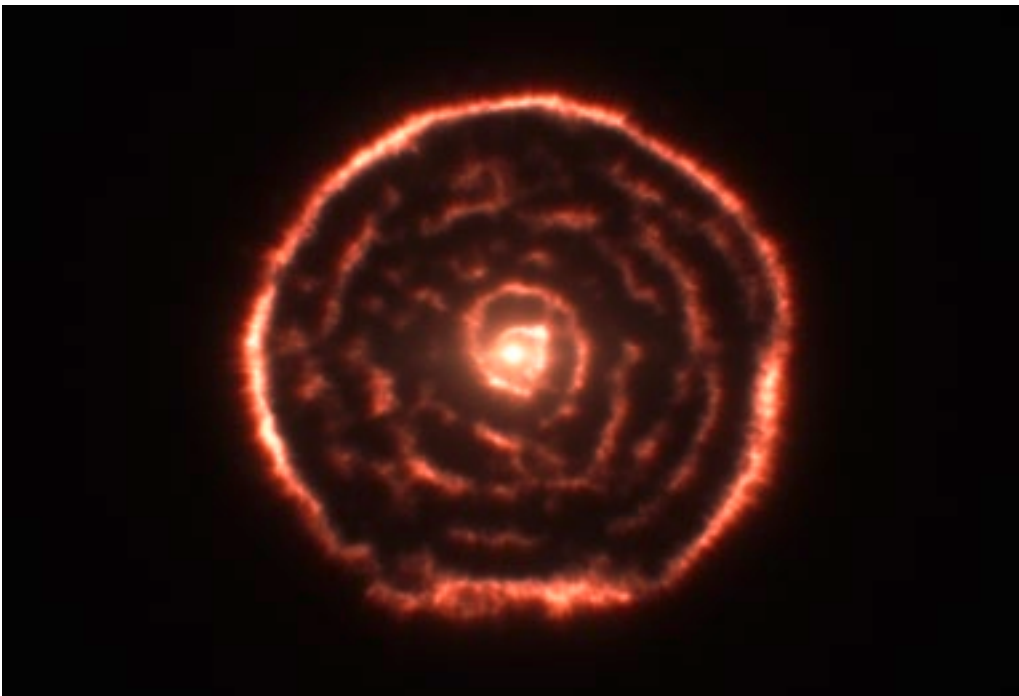


Imagen 31. Estructura de material espiral alrededor de la estrella R Sculptoris. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/M. Maercker et al.

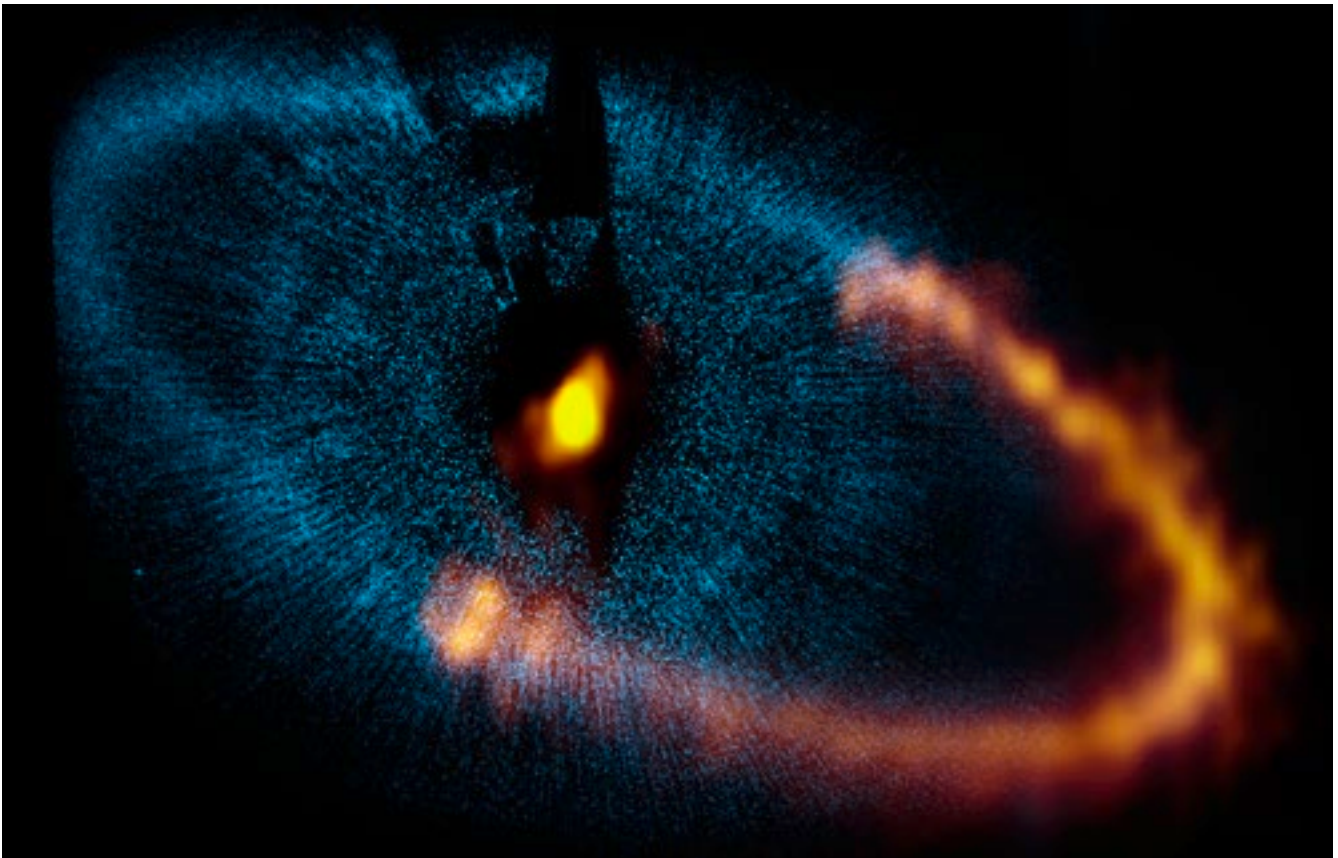
3.3 Formación de estrellas y planetas

Las estrellas brillan por millones o miles de millones de años, pero su formación —que toma algunos miles de años— continúa siendo un misterio. Ello se debe a que los telescopios de luz visible no pueden observar dentro de las polvorientas concentraciones de gas de las que nacen las estrellas. Y los telescopios infrarrojos, que sí pueden revelarnos las estrellas recién nacidas antes de que emerjan completamente de sus polvorientos capullos, no son capaces de observar el proceso de desarrollo de preignición de las estrellas.

Sabemos que inmensas nubes colapsan bajo la fuerza de gravedad para formar estrellas. Pero, ¿cómo se fragmentan en nubes más pequeñas para convertirse en una mezcla de estrellas grandes y pequeñas?, ¿cómo se sobrepone la gravedad a la turbulencia, flujos y fuerzas magnéticas que se resisten al colapso de la nube? Incluso más, ¿cómo siguen las estrellas -destinadas a convertirse en masivas- acumulando gas una vez que ya se encuentran encendidas?, ¿por qué el viento que fluye desde esas estrellas no detiene su expansión?

Imagen 32.
Vista combinada del anillo de polvo alrededor de la estrella Formalhaut captada por el telescopio espacial Hubble (azul) y ALMA (naranja).
Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) y telescopio espacial Hubble de NASA/ESA

ALMA ayudará a desentrañar estos misterios observando en profundidad las nubes de formación de estrellas, detectando la suave luz emitida por la materia que recién comienza a calentarse e incluso mapeando el movimiento de esa materia.



De acuerdo a nuestro actual conocimiento, los planetas se forman alrededor de una nueva estrella al condensarse en un disco de gas molecular y polvo incrustado dentro de una nube molecular más grande. Las condensaciones aumentan hasta convertirse en planetas gigantes, que se calientan, limpian sus órbitas en el disco y posiblemente lo encorvan. El gas que permanece en el disco finalmente desaparece, dejando planetas y un disco de polvo y desechos.

ALMA estudia todas las fases de formación de planetas: sondea los discos protoplanetarios —embriones planetarios— en alta resolución; puede captar el aumento de brillo y temperatura de los planetas en formación y detectar directamente cómo planetas gigantes van limpiando sus órbitas en los discos. ALMA puede encontrar más planetas midiendo los efectos increíblemente pequeños que tienen éstos sobre las estrellas que orbitan y quizás nos permita medir la masa de algunos planetas que ya han sido descubiertos. Además ALMA puede examinar discos de polvo y desechos que permanecen alrededor de las estrellas una vez que el gas ha desaparecido. Utilizando el telescopio ALMA, un grupo de astrónomos descubrió que los planetas que orbitan la estrella Fomalhaut deben ser mucho más pequeños de lo que se pensaba en un principio (imagen 32).

3.4 El estudio del Sol

Sabidamente, la mayoría de los telescopios nunca son apuntados hacia el Sol. Sin embargo, ALMA puede estudiar nuestra estrella sin problemas ya que la superficie de sus antenas difuminan el calor permitiendo enfocar las ondas milimétricas del espectro de luz sin quemar las antenas ni los receptores.

ALMA investiga las grandes erupciones que ocurren en el Sol y su emisión de partículas a alta velocidad. Estudia la estructura y evolución de las protuberancias y filamentos solares, hebras de gas a 6.000°C suspendidas en la atmósfera solar (corona) a 3.000.000°C.

Hasta hoy es un misterio por qué el Sol tiene una atmósfera tan caliente. ALMA sondea su atmósfera justo bajo el punto donde la temperatura se eleva drásticamente. Así nos ayuda a entender áreas de la atmósfera solar que son imposibles de estudiar de cualquier otra forma.

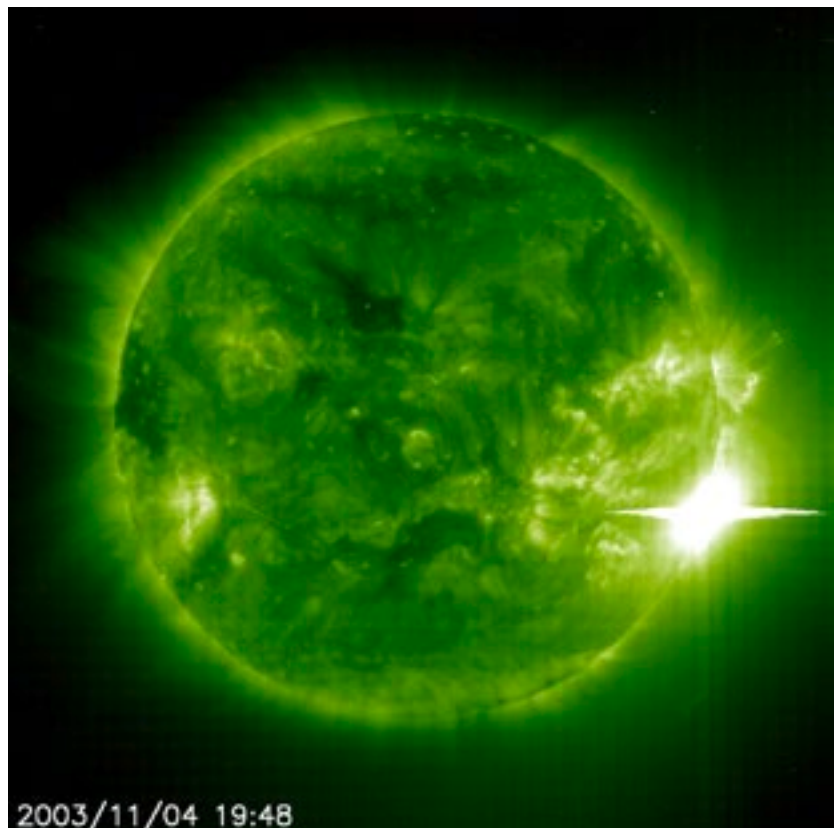


Imagen 33.
Posiblemente una de las erupciones solares más intensas jamás presenciadas, en 2003, vista por el satélite SOHO. Crédito: ESA&NASA

3.5 El entorno de nuestro Sol

El Sistema Solar constituye la pequeña parte del Universo que podemos visitar con sondas robóticas. Pero el dinero sólo alcanza para unas pocas sondas a la vez y son miles los planetas, las lunas, los asteroides y cometas por explorar. Por lo mismo, queda una gran labor para la observación desde la Tierra.

ALMA observa planetas y mide sus vientos. Analiza las moléculas emitidas por cometas y asteroides, incluso cuando están en su punto más activo al pasar cerca del Sol, momento en que otros telescopios no pueden observarlos.

Imagen 34. Cometa C/2001 Q4,
Crédito: T.A. Rector



El estudio de la composición de los cometas nos entrega una nueva visión sobre la formación temprana del Sistema Solar, como también lo hace la observación de moléculas esparcidas en el espacio.

ALMA descubrirá miles de nuevos objetos en el [Cinturón de Kuiper](#) (donde se encuentra Plutón), observando la luz que emiten y no la luz que reflejan del Sol —como eran estudiadas hasta ahora—, permitiéndonos calcular sus tamaños reales.

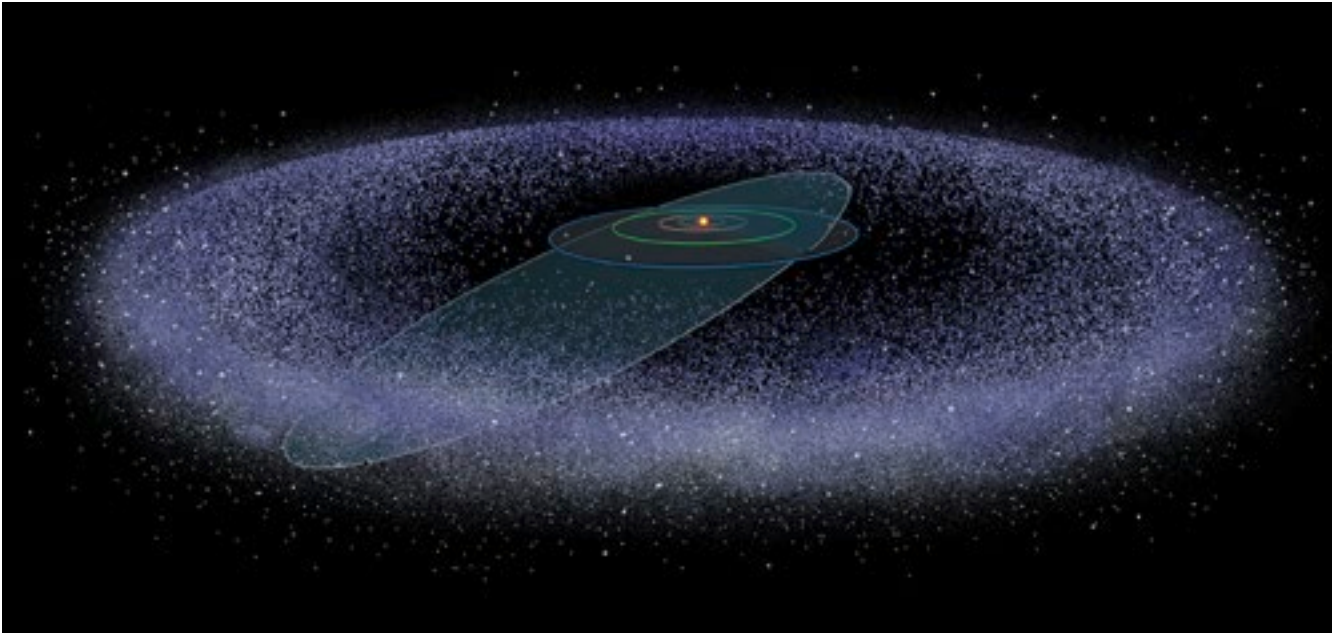


Imagen 35.
Impresión artística del Cinturón
de Kuiper. Crédito: Don Dixon/
cosmographica.com

Autoevaluación

1. Es muy difícil estudiar las primeras estrellas con la tecnología actual, ¿qué ventajas representa ALMA para este estudio y por qué es tan importante estudiar el polvo en el espacio?
2. ¿Qué ventajas tiene la capacidad de ALMA de estudiar moléculas para la comprensión del Universo?
3. De acuerdo a la teoría actual, ¿cómo se forman los planetas?
4. ¿Qué pregunta permanece sin respuesta sobre el Sol, en la que ALMA puede ser relevante?
5. ¿Cuál es la importancia del estudio de los cometas?

4. Actividades



Actividad 1

¡Capta lo invisible!

¿Cómo accedemos a Internet usando el Wi-Fi?, o ¿cómo llega la voz en una llamada por celular? La respuesta en ambos casos es que estamos recibiendo o enviando información usando radiación electromagnética. Un radiotelescopio también capta este tipo de ondas, pero a diferencia de estos aparatos (fuentes artificiales), capta las ondas generadas por las estrellas y otros objetos estelares (fuentes naturales).

OBJETIVO: Identifica las partes principales de un radiotelescopio y su función.



DIBUJA

1. Une con un lápiz los puntos en el orden correcto.
2. Identifica las siguientes partes en el dibujo:
 - Plato, sirve para reflejar las ondas de radio en el receptor.
 - Receptor, capta las ondas de radio.
 - Soporte, mantiene el receptor en la posición del punto focal del plato.
3. Indica tres similitudes entre un radiotelescopio y una antena de televisión satelital como las que se instalan en tu hogar.

4. Encierra en un círculo los aparatos dibujados que usan ondas electromagnéticas.



Actividad 1

¡Capta lo invisible! | Nota Docente

Esta actividad permite que los niños identifiquen aspectos básicos de la radioastronomía, ciencia que analiza las ondas de radio captadas con un radiotelescopio. La antena de un radiotelescopio está configurado por una serie de componentes.

ANTECEDENTES

Los radiotelescopios funcionan de manera muy similar a una radio. Gracias al tamaño de sus reflectores, los radiotelescopios pueden detectar ondas de radio muy débiles. El reflector o plato dirige las ondas de radio hacia la antena. Este efecto puede compararse con la forma en que un espejo común y corriente refleja la luz visible. En los telescopios ópticos, que detectan la luz visible, normalmente hay un espejo que cumple la misma función que el reflector de un radiotelescopio.

Los astrónomos pueden "enfocar" un determinado cuerpo celeste con el fin de recoger mucha más radiación de dicho cuerpo de la que se podría captar sin un reflector, usando solo la antena. De esa forma, pueden detectar hasta las ondas de radio más débiles del espacio.

Las radios, la señal del Wi-Fi, el celular, la televisión entre otros, usan ondas de radio en diferentes frecuencias, las cuales son invisibles a la vista.

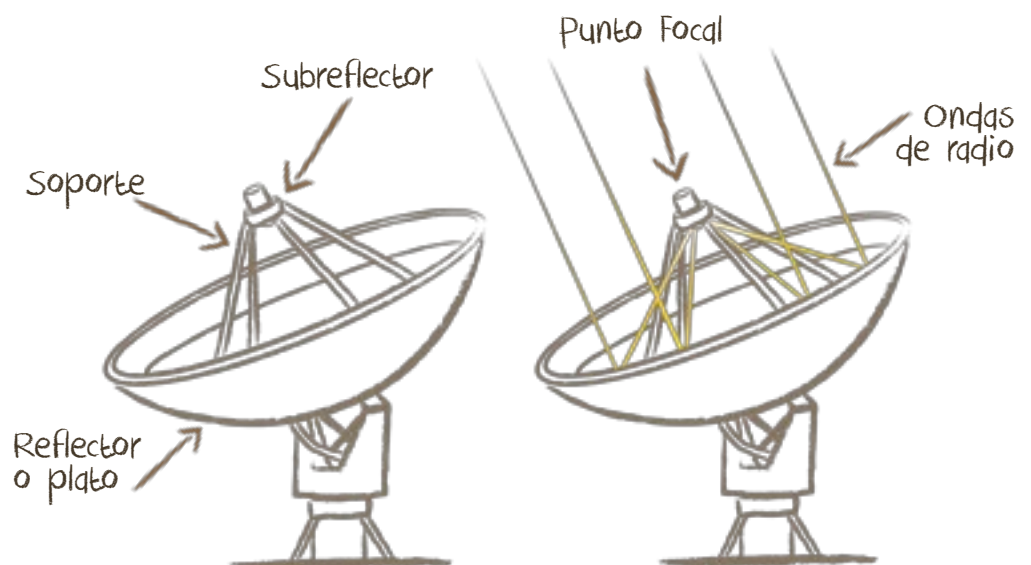
PREPARACIÓN

Imprime y copia una hoja de trabajo de la actividad, para cada estudiante.

Revisa las láminas que acompañan este manual, e identifica las imágenes relacionadas a esta actividad (láminas 1, 2 y 3).

IMPLEMENTACIÓN

- Píde a los alumnos que unan los puntos en el dibujo.
- Pregúntales si reconocen lo que dibujaron.
- Explícales qué es un radiotelescopio, escribe cada uno de los términos claves en el pizarrón.
- Pídeles que hagan el resto de las actividades.
- Pregunta a los alumnos qué cosas asocian al concepto de radiotelescopio y escribe sus respuestas para crear un mapa conceptual en la pizarra. Solicita que lo copien en su cuaderno. Si los estudiantes no conocen las ventajas de un mapa conceptual para su aprendizaje, es un buen momento para enseñarles.
- Las antenas de televisión captan las señales de fuentes artificiales (satélites) y tienen una estructura similar a un radiotelescopio.
- Puedes solicitar a los estudiantes que nombren otros dispositivos que usen ondas de radio.



Actividad 2

¿Oíste eso? Amplifica el sonido con un cono de papel

El plato de un radiotelescopio funciona reflejando las ondas de radio a un punto común, llamado punto focal. Las ondas sonoras también pueden dirigirse y de esta forma aumentar su volumen. Realiza los siguientes experimentos y responde en tu cuaderno.

OBJETIVO: Comprender cómo funciona la antena parabólica de un radiotelescopio.

AUMENTANDO EL VOLUMEN

Materiales

- 1 hoja de papel

Procedimiento

- Haz un experimento en pareja.
- Toma una hoja de papel y enróllala para darle la forma de un cono. Ponte a 2 metros de distancia de tu compañero y dile algo a través del cono.
- Ahora repíteselo sin usar el cono.

¿Notaste alguna diferencia?

AMPLIFICANDO LA SEÑAL

Procedimiento

- Nuevamente, elige a un compañero y siéntate a 2 metros de distancia de él. Uno de los dos debe leer el siguiente texto al otro a volumen moderado:

“Puedes oír sonidos altos o bajos. A veces no logras oír a alguien con claridad y otras veces puedes oírlo perfectamente.”

- Intercambien roles.
- Ahora repitan el experimento. Mientras uno lee el texto el otro escucha, pero esta vez poniendo las manos detrás de las orejas. Asegúrense de que el texto se lea al mismo volumen que antes.
- Nuevamente, ¡cambien los roles!

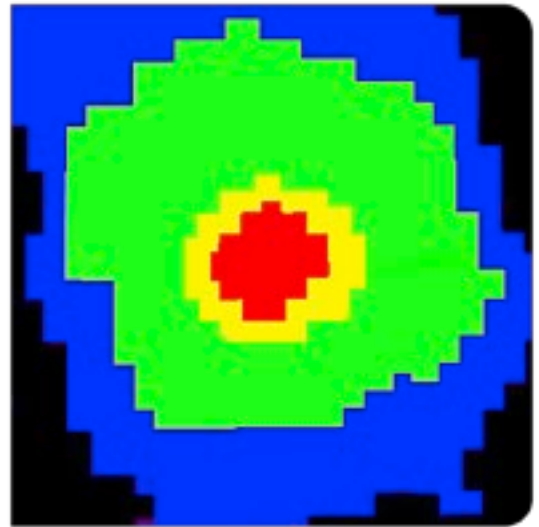
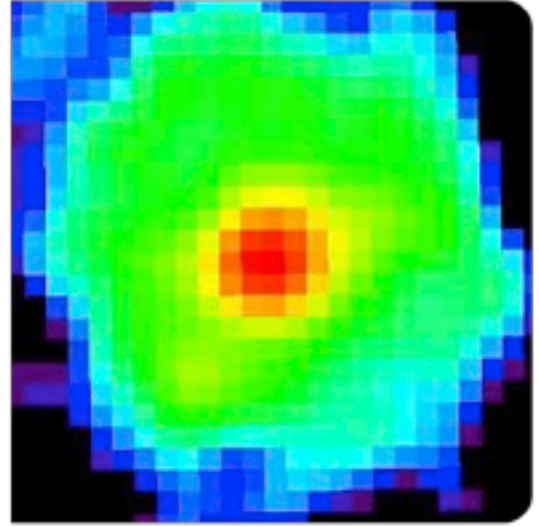
¿Notaste alguna diferencia?



LAS ANTENAS PARABÓLICAS

¿Por qué los radiotelescopios tienen esa forma?





AUMENTANDO EL VOLUMEN

Analiza

- Observa las imágenes de arriba.
- En la primera se muestra el radiotelescopio de Arecibo ubicado en Puerto Rico, que tiene un diámetro de 305 metros.
- En la segunda se muestra el plato de un radiotelescopio de 20 metros.
- Al lado derecho se muestran las imágenes del mismo cuerpo celeste, pero captadas por cada radiotelescopio.

Responde

¿Cuál es la diferencia entre las dos imágenes de radio?

¿Cuál radiotelescopio crees que produce la mejor imagen de radio?

Explica tu respuesta, usando los conceptos siguientes: reflector, superficie, sensibilidad, punto focal.

Actividad 2

¿Oíste eso? | Nota Docente

Esta actividad permite que los niños experimenten los efectos de usar un reflector tanto para aumentar su voz, como para aumentar el sonido que escuchan.

OBJETIVO: Comprender cómo funciona la antena parabólica de un radiotelescopio.

ANTECEDENTES

Nuestras orejas también son una especie de reflector: ayudan a captar ondas de sonido y dirigir las hacia nuestros tímpanos, que en este caso serían nuestras antenas. Si ponemos las manos detrás de los oídos podemos ampliar estos "reflectores" y, por lo tanto, mejorar nuestra capacidad auditiva.

IMPLEMENTACIÓN

1. Comenta sobre la forma en que podemos emitir sonidos a diferente volumen (lámina 4).
2. Pregunta qué ven en la imagen. Explícales que se puede orientar un sonido en una dirección específica con la ayuda de un cono para que la persona a quien se quiere hacer llegar ese sonido lo escuche mejor.
3. Comenta que antes no había audífonos ni parlantes y que, para amplificar los sonidos electrónicos, se usaban gramófonos. Muéstrales la lámina 5.
4. Pide a los alumnos que describan lo que ven en la lámina 5. Explícales que es un gramófono que sirve para amplificar el sonido, de la misma forma que sus conos.
5. Comenta el principio básico: mientras más grande sea el cono, ¡aumenta el volumen del sonido!
6. Explica que nuestras orejas funcionan como conos invertidos.
7. Explica que oímos mejor los sonidos cuando ponemos las manos detrás de las orejas.
8. Explica que la forma del reflector de un radiotelescopio es similar a la de nuestras orejas. Muéstrales las antenas de ALMA en la lámina 6 y descubre junto a ellos su forma parabólica y sus dimensiones.
9. Comenta el ejercicio, los radiotelescopios usan el mismo principio: a mayor reflector, mayor cantidad de ondas de radio captadas.

RESPUESTAS

1. ¿Notaste alguna diferencia?
El volumen aumenta.
2. ¿Notaste alguna diferencia?
Se escucha mejor.
3. ¿Por qué los radiotelescopios tienen esa forma?
Para captar mayor cantidad de ondas de radio.
4. ¿Cuál es la diferencia entre las dos imágenes de radio?
La primera tiene más detalles.
5. ¿Cuál radiotelescopio crees que produce la mejor imagen de radio?
El que tiene el reflector más grande.
6. Explica tu respuesta, usando los conceptos siguientes: reflector, superficie, sensibilidad, punto focal.
Mientras más grande sea su reflector, más sensible es el radiotelescopio a la radiación proveniente del espacio. Esto se debe a que un reflector más grande es capaz de reflejar una mayor cantidad de radiación en el punto focal de la antena, gracias a su mayor superficie. Por lo tanto, mientras más grande sea el radiotelescopio, más sensible será para captar objetos poco brillantes del Universo.

Actividad 3

Crea una imagen de radio

La información recibida por un radiotelescopio es registrada y convertida en un conjunto de números, que luego de ser procesados se convierten en imágenes.

OBJETIVO: Comprender cómo se forma la imagen de un radiotelescopio.

MATERIALES

- Lápices de colores

ANTECEDENTES

Es imposible reflejar directamente en una fotografía las ondas de radio captadas por los radiotelescopios, tal como se haría con una cámara fotográfica. Por eso, los astrónomos colorean sus imágenes de radio con colores "visibles" para nosotros.

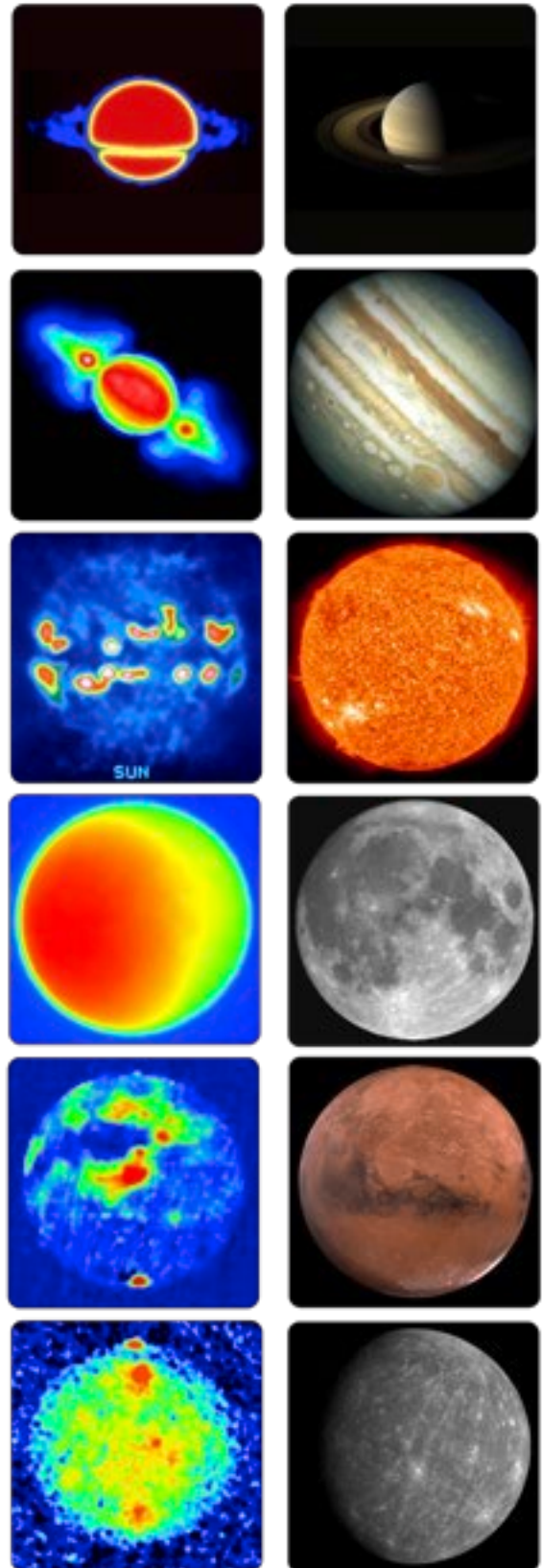
De manera general, el proceso consiste en apuntar el radiotelescopio a un lugar preciso en el cielo y registrar la señal que de allí proviene. Luego se apunta al lugar inmediatamente a continuación, almacenando la información respectiva. Así se obtiene un archivo similar al que se muestra en la siguiente página.

El radiotelescopio escanea el objeto celeste de manera secuencial recibiendo las ondas de radio de cada pequeño punto en el espacio alrededor del objeto. Algunas áreas pueden tener ondas de radio más fuertes que otras. Toda la información de las intensidades se asocia a su respectiva posición de manera numérica. Por ejemplo, si las ondas de radio son débiles en una posición en particular, se registraría un valor numérico pequeño. Si no hay ondas de radio provenientes de ese punto, la computadora asigna un cero en a ese punto.

OBSERVA

Las imágenes muestran algunos objetos espaciales fotografiados tanto con luz visible como con luz invisible para el ojo humano (ondas de radio). En cada imagen se aprecian diferentes propiedades. En la Luna, por ejemplo, con la luz visible se pueden ver zonas de un gris más oscuro, que no se detectan cuando se usan ondas de radio. Con la luz invisible (radio) se puede ver el campo magnético de Júpiter, que no aparece en la imagen a la derecha. Los anillos de Saturno, en tanto, son visibles en ambos tipos de luz.

1. Identifica los objetos mostrados en las imágenes.
2. Comenta aquellos que te llaman más la atención.



Actividad 3

Crea una imagen de radio | Nota Docente

Esta actividad tiene como objetivo que los estudiantes comprendan la forma en que un radiotelescopio recopila la información, que luego será utilizada para generar una imagen. El proceso se explica de forma sencilla, dejando de lado varios aspectos técnicos.

MATERIALES

- Lápices de colores
- Una copia de la hoja de trabajo por alumnos

IMPLEMENTACIÓN

Explica a los alumnos la existencia de luz visible e invisible.

Explícales por qué los astrónomos observan el cielo con radiotelescopios.

Pídeles que hagan el ejercicio 1 de la hoja de trabajo.

Una vez que hayan terminado, comenta el ejercicio. Explícales que dibujaron una imagen de radio. Diles que los radiotelescopios observan el Universo usando una luz diferente de la que vemos nosotros y que eso produce imágenes diferentes.

Con ayuda de la lámina 7, explícale a los alumnos que hay distintos 'tipos de luz' en el espectro electromagnético, como la infrarroja, los rayos X o la luz visible.

Muéstrales la lámina 8 y explícales que se trata de una imagen de radio.

Explícales por qué los astrónomos generan imágenes con radiotelescopios en vez de usar telescopios ópticos.

Pregúntales cuáles son las diferencias entre los dos tipos de imágenes del mismo objeto y cuáles son las similitudes.

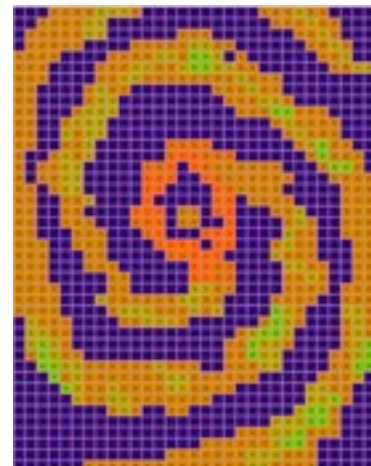
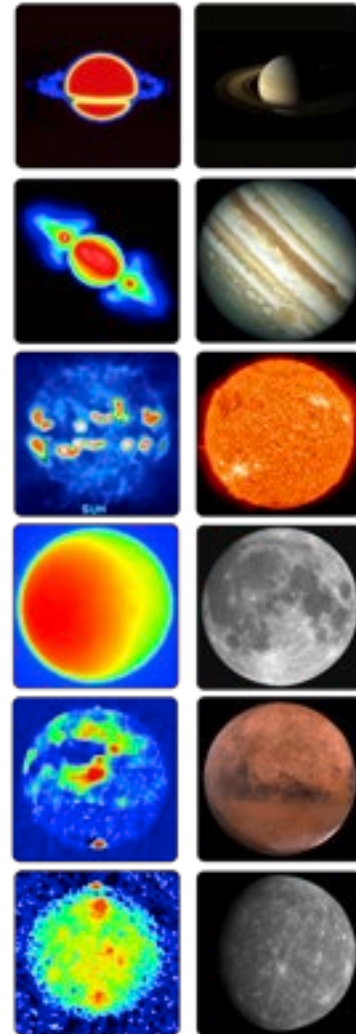
OBSERVA

En el orden decreciente, los objetos que aparecen en las fotografías son: Saturno, Júpiter, Sol, Luna, Marte, Mercurio.

Se observan los anillos de Saturno en ambos tipos de luz. Mientras que en Júpiter se observan emisiones de radio generadas por intensas corrientes en su magnetósfera.

PINTA CADA PIXEL

La imagen que se obtiene es similar a la que se muestra a continuación. Solicita a los estudiantes que digan qué asocian con la estructura representada en la imagen, la que parece una galaxia espiral.



Actividad 4

Radiotelescopio de papel | Fabrica un radiotelescopio

Los radiotelescopios son como una radio gigante, pero a diferencia de ellas, pueden enfocar o apuntar a las fuentes de radio. Los radiotelescopios pueden cambiar de orientación para observar distintos objetos del Universo. Lo mismo hacemos con nuestras orejas: la mejor forma de escuchar un sonido es girar la cabeza de forma que nuestro oído apunte a la fuente del sonido. Mientras los cuerpos celestes emiten radiación porque poseen diversas temperaturas (nivel de agitación molecular), los objetos en la Tierra emiten sonidos porque vibran. Estos, a su vez, hacen vibrar el aire, y nosotros captamos las vibraciones con nuestros oídos.

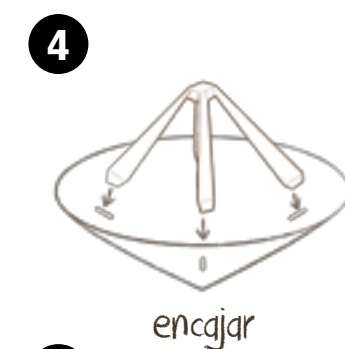
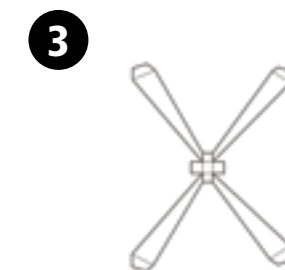
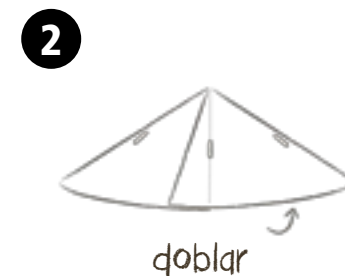
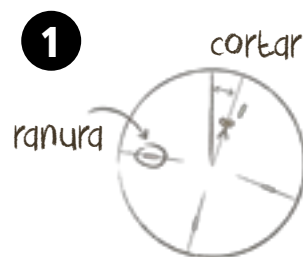
OBJETIVO: Identificar las partes principales de un radiotelescopio y su función. Relacionar ondas sonoras y electromagnéticas a través de sus propiedades básicas.

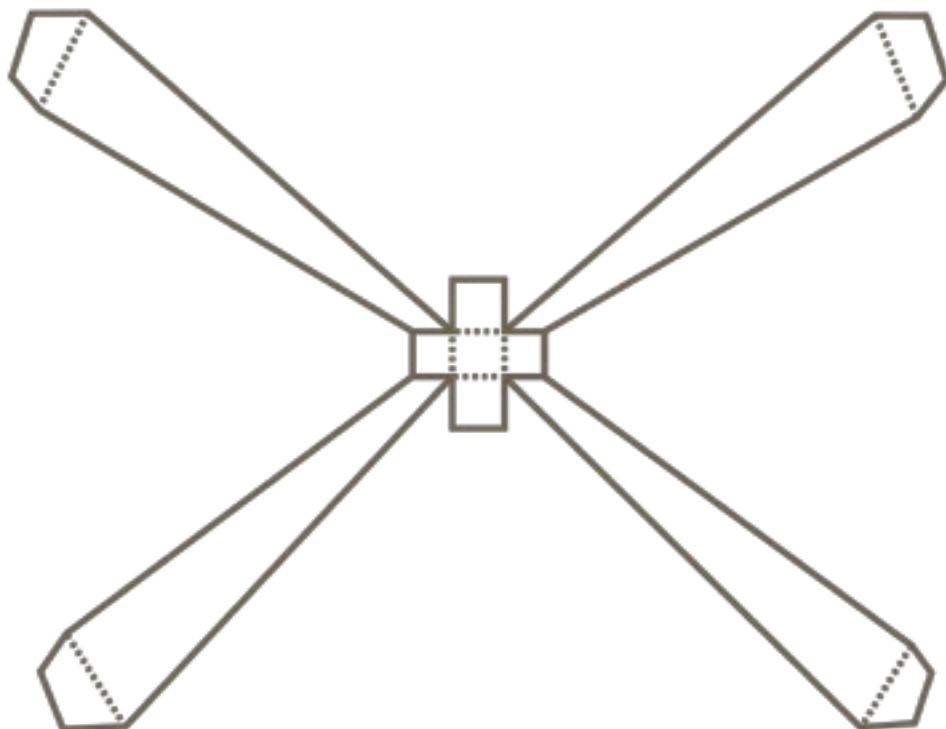
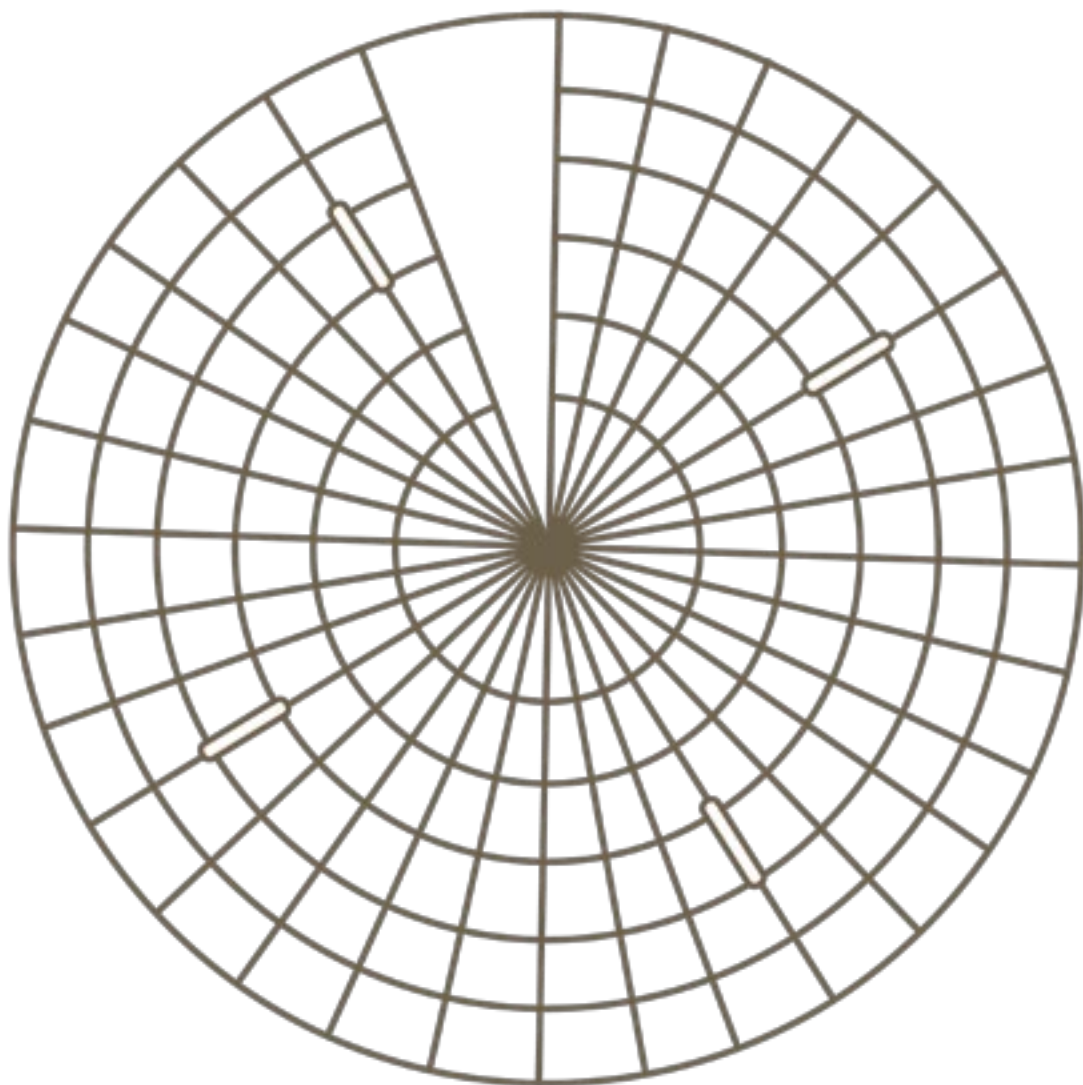
MATERIALES (por pareja)

- tijeras
- pegamento
- 2 tubos de papel higiénico
- lápices
- papel

PROCEDIMIENTO

1. Corta con cuidado el disco que hay al final de esta actividad. ¡No olvides las ranuras! Mira el ejemplo.
2. Corta la línea donde hay una tijera dibujada en la ilustración de la derecha. Pon pegamento en la franja blanca y pega las dos extremidades superponiéndolas.
3. Verifica que las líneas dibujadas queden en la parte interior del reflector.
4. Ahora monta la antena: Corta la figura que hay abajo del disco
5. Las líneas punteadas son líneas de pliegue. Dobla esas partes hacia atrás.
6. Aplica pegamento a las patas de la antena.
7. Inserta las patas de la antena en las ranuras y pégalas al otro lado del reflector.
8. Pega el reflector a un tubo de papel higiénico, y listo ¡Acabas de fabricar tu propio radiotelescopio!





Actividad 4

Radiotelescopio de papel | Fabrica un teléfono de cuerda

Ahora harás un experimento en pareja y fabricarás un teléfono de cuerda.

MATERIALES (por pareja)

- 2 vasos plásticos rígidos
- 4 metros de hilo volantín
- 2 clip
- lápices

PROCEDIMIENTO

1. Usa la punta del lápiz para hacer un pequeño agujero en el fondo de cada vaso.
2. Introduce las extremidades del hilo en cada uno de los agujeros. Amarra los extremos al clip, para evitar que el hilo se salga.
3. Usa los vasos como si fueran un teléfono para hablar con tu compañero.
4. Asegúrate de que la cuerda esté bien estirada y tensada.

Si bien el comportamiento es similar, en este experimento usamos ondas sonoras, mientras que en ALMA se trabaja solo con receptores de ondas electromagnéticas.

PREDICE

¿Qué crees que sucederá al hablar por uno de los extremos?

.....
.....

COMPRUEBA

¿Cuál es el mínimo de volumen del sonido que se puede transmitir?

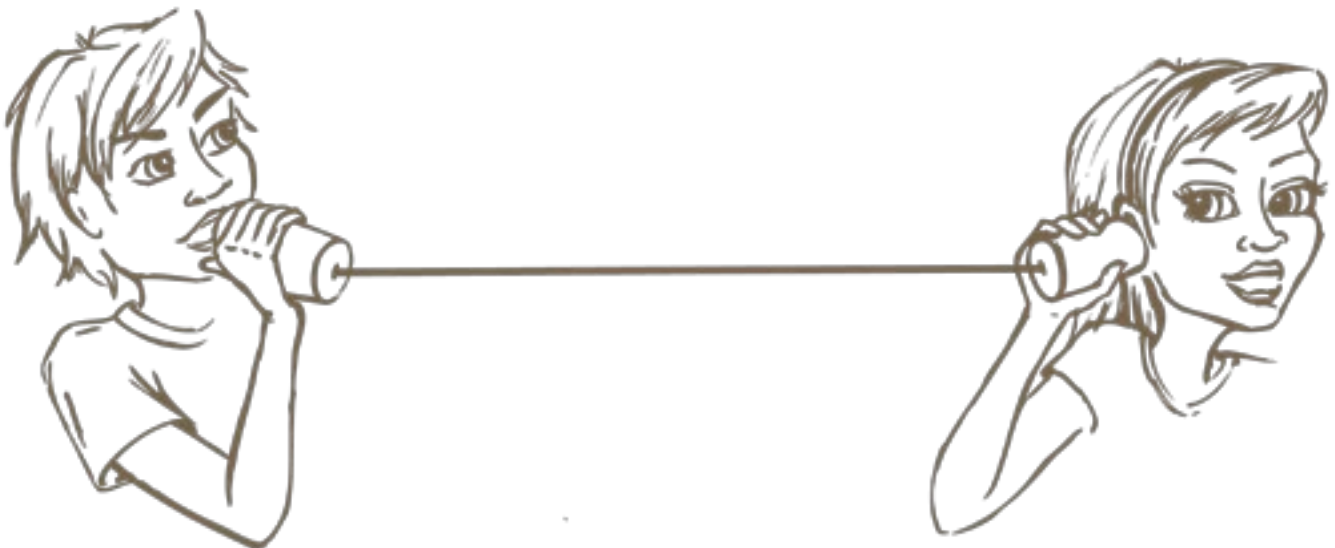
.....
.....

¿Cómo afecta la tensión del hilo?

.....
.....

¿Qué función cumple el vaso?

.....
.....



Actividad 4

Radiotelescopio de papel | Nota docente

Esta actividad permite a los estudiantes familiarizarse con la forma de los radiotelescopios. Aprender que, además del aire, hay otros elementos que transportan el sonido.

ANTECEDENTES

La construcción del radiotelescopio da a los estudiantes la oportunidad de relacionarse de manera concreta con los elementos básicos del mismo.

Puedes profundizar sobre la diferencia entre la forma de un cono como el que estás usando y una parábola como el plato de una antena de ALMA. Por ejemplo, si el cono estuviera cubierto con papel plateado, los rayos de luz provenientes del Sol se concentrarían sobre el eje de él, a diferencia de un reflector parabólico, que concentra todos los rayos en el mismo punto. En este sentido los conos no parecen ser buenos reflectores.

Cuando el sonido se emite en el interior del vaso, las ondas hacen vibrar el fondo del vaso, transmitiendo la onda a la cuerda. Esta onda viaja por la cuerda hasta el otro vaso, donde se da el proceso inverso, la vibración del fondo del vaso se transmite al aire y a nuestros oídos.

Cuando la cuerda no está tensa, la energía de la vibración se disipa y no alcanza el otro extremo.

PREPARACIÓN

- Imprime una copia para cada estudiante de una hoja de trabajo de la actividad, y de las piezas para armar un radiotelescopio.
- Solicita los materiales a los estudiantes con anticipación.
- Puede ser útil tener los vasos perforados con anticipación.
- Muéstrales las láminas 4 y 5 de la actividad.

IMPLEMENTACIÓN

- Solicita a los alumnos que inicien la actividad y los que hayan terminado ayuden a sus compañeros.
- Cuando todos los alumnos hayan terminado, pídeles que describan lo que hicieron. Ayúdalos preguntando si saben por qué hay una estructura –tipo araña- sobre el plato de la antena y qué función cumple. Explícales que corresponde al subreflector, que redirige la señal captada por el plato hacia los receptores de cada antena.
- El sonido son ondas de presión que hacen vibrar el aire. Demuéstralo sujetando y soplando el canto de una hoja de papel, haciendo que produzca un sonido grave. Explícales que la hoja vibra con mucha rapidez haciendo que el aire a su alrededor oscile. Esa vibración llega hasta nuestros oídos y nos permite oír el sonido.
- Pídeles que hagan la actividad siguiente.
- Comenta la actividad. Explícales que el sonido no se propaga solo a través del aire, sino también de otros elementos como el agua o el hilo.
- Pregúntales sobre la tensión de la cuerda y los vasos.
- Si se cuenta con tiempo, puedes preguntar a los estudiantes si es posible unir dos teléfonos. Antes de hacer el experimento, solicita que hagan predicciones.

Actividad 5

Relación entre temperatura y longitud de onda

Explora la Ley de desplazamiento de Wien

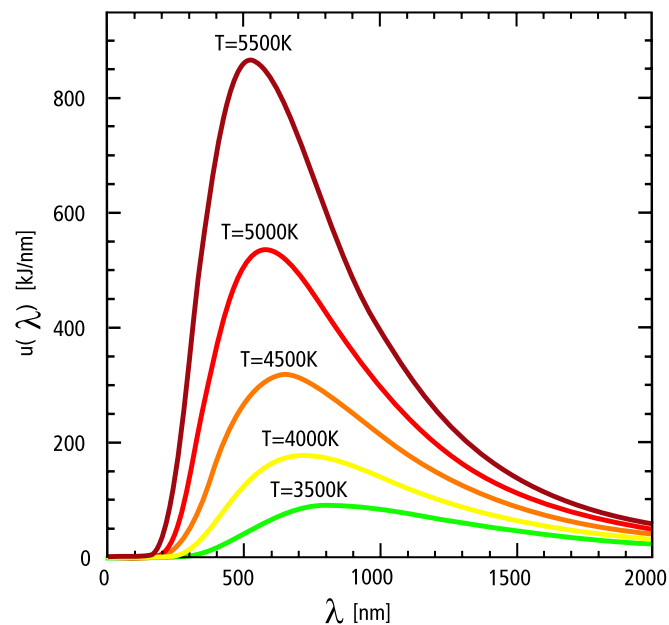
Uno de los procesos más comunes en los que se genera radiación electromagnética, es la radiación térmica, que se percibe fácilmente al acercar la mano a tu piel o a un objeto caliente. Pero no la podemos ver a simple vista. Su longitud de onda depende de la temperatura del cuerpo.

OBJETIVO: Comprender la relación entre temperatura y la longitud de la radiación emitida.

RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

Un cuerpo negro es un objeto imaginario que se caracteriza por absorber toda la radiación que le incide en todas las longitudes de onda y también emitirlas. Su punto de máxima emisión se da para una longitud de onda que depende únicamente de la temperatura del cuerpo.

A medida que la temperatura del cuerpo negro aumenta, se desplaza el punto de máxima emisión hacia longitudes de onda más pequeñas en su espectro (frecuencias más altas). Esto explica por qué un trozo de metal cuando comienza a calentarse toma un color rojo incandescente (longitudes de onda en torno al rojo), y conforme la temperatura aumenta, se vuelve de color blanco (longitudes de onda en la mitad del rango visible).



LEY DE WIEN

La longitud de onda de emisión máxima, λ_{max} de la distribución de un cuerpo negro en función de la temperatura T , está dada por la ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

donde $b = 2.897769 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ es conocida como la constante de desplazamiento de Wien.

APLICA

- ¿Cómo varía la longitud de onda máxima con la temperatura?
- La longitud de onda de emisión máxima para la emisión del Sol está en el rango de luz visible para el ojo humano. ¿Es una coincidencia?
- Podemos usar la ley de desplazamiento de Wien para calcular la longitud de onda de emisión máxima para emisiones de cuerpo negro de objetos a diferentes temperaturas. Completa las celdas en blanco en la siguiente tabla:

Objeto	Temp.	Longitud de onda máxima
Una estrella como el Sol (superficie)	5500 K	
Temperatura ambiente	300 K	
Nubes de polvo en el espacio interestelar		0,15 mm

Actividad 5

Relación entre temperatura y longitud de onda

Nota docente

Esta actividad permite a los estudiantes comprender la relación existente entre la radiación emitida por un objeto a una determinada temperatura y color característico (longitud de onda).

ANTECEDENTES

La radiación de cuerpo negro es la radiación de calor emitida por un objeto idealizado, llamado cuerpo negro, que absorbe toda la radiación que cae sobre él antes de re-emitirla. Varios objetos astronómicos radian con un espectro que se aproxima al de un cuerpo negro a una temperatura dada.

La imagen muestra el diagrama de Hertzsprung–Russell, que resume muchos de los conocimientos que tenemos de las estrellas hoy en día. Una de las cosas que podemos apreciar es justamente la relación entre la temperatura y el color de una estrella: así la superficie del Sol, con 5778 grados Kelvin de temperatura, brilla más fuertemente en las longitudes de onda que nuestros ojos ven como amarillo-verdoso, y que corresponde a unos 502 nanómetros (cifra 2000 veces más pequeña que un milímetro). Estrellas más frías son más rojas y las más calientes son azules.

PREPARACIÓN

Imprime y copia una hoja de trabajo de la actividad, para cada estudiante.

Puedes mostrar la lámina 9, con el diagrama de Hertzsprung-Russell.

IMPLEMENTACIÓN

- Explica los aspectos principales del diagrama Hertzsprung-Russell.
- Nota que a medida que desciende la temperatura del objeto que queremos estudiar hasta unas décimas de kelvin, la longitud de onda de emisión máxima se encuentra alrededor del rango submilimétrico/milimétrico.
- Algunos de los objetos más fríos en el Universo, tales como las nubes gigantes de polvo y gas molecular donde se forman las nuevas estrellas, tienen temperaturas en este rango. Esto explica por qué la astronomía submilimétrica es vital para estudiar las longitudes de onda de emisión máxima en las cuales estas nubes emiten la mayor parte de su radiación de calor.

- El radiotelescopio ALMA permite el estudio de longitudes de onda milimétrica y submilimétrica. Solicita a los estudiantes que estimen las temperaturas de los objetos que podrían observarse.

RESPUESTAS

1. ¿Cómo varía la longitud de onda máxima con la temperatura?

Varía inversamente que la temperatura. Cuando aumenta la temperatura, el máximo de emisión de la longitud de onda se torna más corto.

2. La longitud de onda de emisión máxima para la emisión del Sol está en el rango de luz visible para el ojo humano. ¿Es una coincidencia?

No, hay una evolución natural que ha hecho que el ser humano se adapte a un medio abundante en luz visible.

3. Calcula los valores de la tabla.

527 nm, 10 micrómetros, 0,15 mm

Actividad 6

La resolución angular y el límite de difracción

¿Cuál es el nivel de detalles finos que se puede detectar?

El diámetro de un telescopio determina su poder de resolución. La luz, ya sea pasando a través de una apertura, un lente, o siendo reflejada por un espejo, se esparce debido a la difracción. Este esparcimiento crea un límite fundamental en los detalles finos (ángulos pequeños) que pueden ser detectados por el telescopio.

RESOLUCIÓN

El diámetro de un telescopio determina su poder de resolución. En el caso de un telescopio con un espejo primario de diámetro D , operando en una longitud de onda λ , su resolución máxima (expresada como un ángulo en radianes) es dada aproximadamente por:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

Donde el ángulo debe ser medido en radianes, en lugar de grados. Hay 2π radianes en un círculo, en contraposición a los 360 grados. Para hacer una conversión de radianes a grados, se debe multiplicar por $360/2\pi$.

APLICA

1. ¿Cómo cambia la resolución de un telescopio a medida que la longitud de onda aumenta? ¿Qué sucede cuando el tamaño del telescopio aumenta?
2. Si la distancia desde la Tierra hasta la Luna es de aproximadamente 380.000 km, y el diámetro de la Luna es de 3.500 km. ¿Cuál es su tamaño angular en el cielo en arcminutos?
3. Calcula los límites de difracción (resolución) para algunos telescopios ópticos modernos, como también para el ojo humano y para el telescopio original de Galileo. Usa una longitud de onda de luz visible de 500 nm. Expresa tus resultados en arcosegundos en el recuadro de la derecha.

4. ¿Cuáles fueron los detalles más finos que Galileo pudo distinguir en la Luna, en 1609, usando su telescopio, asumiendo una óptica perfecta? ¿Y cuáles serían en el caso de del telescopio espacial Hubble?

5. ¿Qué resolución angular tendría el telescopio espacial Hubble si observara longitudes de onda de 1 mm?

6. Junto a ALMA en el llano de Chajnantor, está el telescopio APEX, el Experimento Pionero de Atacama (Atacama Pathfinder Experiment). Su único plato principal tiene un diámetro de 12 metros, similar a una antena de ALMA, y recibe señales milimétricas y submilimétricas. ¿Cuál es su resolución angular en longitud de onda de 1 mm?

7. ¿Qué tan grande debería ser una sola antena como APEX para igualar la resolución del telescopio espacial Hubble en luz visible, si APEX observara en longitudes de onda de 1 mm? ¿Es esto posible?

Objeto	Diámetro	Resolución
Ojo humano	5 mm	
Telescopio Galileo	1,5 cm	
Telescopio espacial Hubble	2,4 m	
VLT, ESO (un espejo)	8,2 m	

Actividad 6

La resolución angular y el límite de difracción

Nota docente

Esta actividad permite a los estudiantes comprender el concepto de resolución de un telescopio y hacer cálculos simples de diversos aparatos.

PREPARACIÓN

Identifica las imágenes relacionadas a esta actividad (lámina 10).

IMPLEMENTACIÓN

- Explica en qué consiste la difracción.
- Explica como afecta la difracción la resolución de un telescopio.
- Da otros ejemplos donde se aprecie la difracción, como en el caso de las ondas sonoras.
- Una vez que los estudiantes realicen la actividad, es conveniente que discutan sus respuestas.
- Explica como se transforman los ángulos a distancias, explica las unidades que aparecen.
- De ser necesario conviene que los estudiantes demuestren sus cálculos a sus compañeros.

RESPUESTAS A PREGUNTAS DE PÁGINA ANTERIOR

1. La resolución empeora a medida que la longitud de onda crece, y mejora cuando el tamaño del telescopio aumenta.
2. 32 arcominutos.
- 3.

Objeto	Díámetro	Resolución
Ojo Humano	5 mm	21 arc sec
Telescopio Galileo	1,5 cm	6,9 arc sec
Telescopio Espacial Hubble	2,4 m	0,04 arc sec
VLT, ESO (un espejo)	8,2 m	0,01 arc sec

4. Galileo: aproximadamente 13 km. Telescopio espacial Hubble: cerca de 80 m.
5. 1,4 arcominutos.
6. 17 arcosegundos.
7. 4,8 km, lo que es imposible de construir.

Actividad 7

Usando interferometría en radiotelescopios ¿Cómo combinar varias antenas para obtener una imagen?

La Interferometría es una técnica donde múltiples antenas o telescopios individuales son vinculados unos con otros y sus señales combinadas para simular el efecto de un solo telescopio gigante.

OBJETIVO: Comprender en que consiste un interferómetro como ALMA

INTERFERENCIA

La interferencia es un fenómeno propio de las ondas, que consiste en la combinación de dos o más ondas en el mismo punto del espacio, dando como resultado una mayor intensidad (interferencia constructiva) o una disminución de la misma (interferencia destructiva).

Para que ocurra, las ondas deben ser coherentes, es decir, sus crestas y valles deben estar en fase. La interferencia destructiva ocurre cuando a un punto del espacio se superpone un valle con una cresta, mientras que la constructiva ocurre cuando coinciden las crestas o los valles.

ALMA ES UN INTERFERÓMETRO

La resolución de un interferómetro como ALMA no depende del diámetro de los reflectores individuales, sino de la separación máxima entre las antenas o línea de base. Las señales de las antenas se combinan y se procesan en una súpercomputadora —el Correlacionador de ALMA— para simular el funcionamiento de un telescopio individual.

De esta forma la resolución efectiva del telescopio está dada por:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

donde B es la máxima separación (o “línea de base”) entre cada telescopio en el grupo. En el caso de ALMA nos referimos a un plato individual como “antena”, y a todo el conjunto como “telescopio”.

ALMA cuenta con 66 antenas gigantes, de 12 y 7 metros de diámetro, repartidas a través del llano de Chajnantor (a 5.000 mt de altitud), donde la distancia de mayor separación o línea de base, es de 16 kilómetros entre las antenas más lejanas entre sí.

APLICA

1. Si las antenas de ALMA están distribuidas alrededor de 16 kilómetros, ¿cuál es la resolución de ALMA cuando observa en longitudes de onda de 1 mm?,
2. ¿Cómo se compara esto con la resolución del telescopio espacial Hubble en ondas visibles?
3. Investiga cómo se trasladan las antenas para posicionarlas en las distintas configuraciones (www.almaobservatory.org)



Antenas de ALMA sobre el llano de Chajnantor... Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), O. Dessibourg

Actividad 7

Usando interferometría en radiotelescopios

Nota docente

Esta actividad permite a los estudiantes conocer la técnica de la Interferometría y comprender una de las características claves de ALMA.

PREPARACIÓN

Identifica las imágenes relacionadas a esta actividad (láminas 11 a 14).

MATERIALES

- Radio portátil
- Control remoto
- Celular



DEMOSTRACIÓN

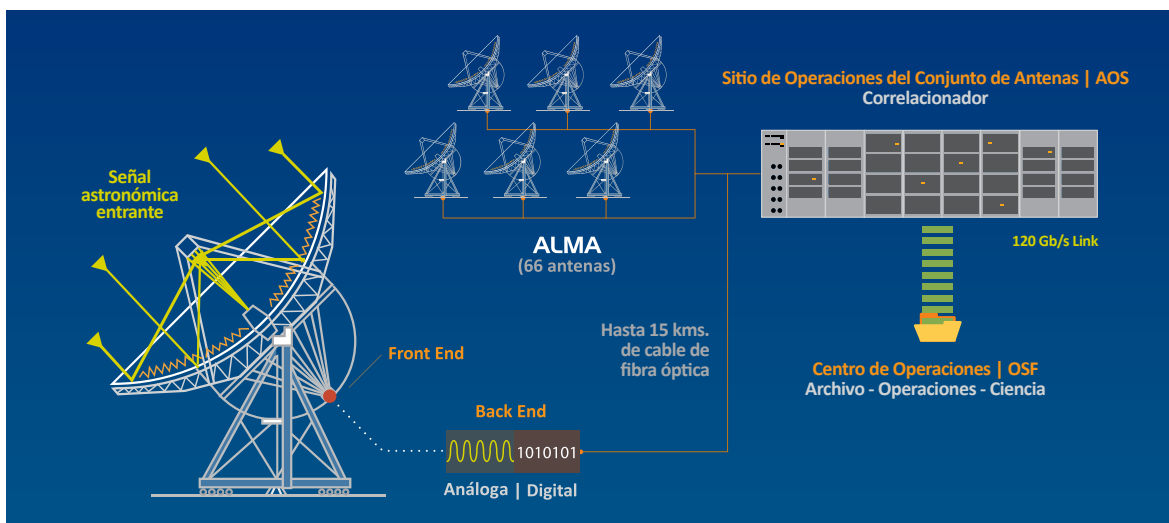
- Píde a los alumnos que nombren algunos aparatos que usan ondas de radio.
- Expícales que los astrónomos usan radiotelescopios para captar ondas de radio provenientes del espacio.
- Demuéstrales que algunos aparatos usan el mismo tipo de radiación que las radios enseñándoles a generar interferencia en una señal de radio.
- Enciende una radio portátil y diles que escuchen atentamente lo que sucede cuando presionan el botón de un control remoto.
- Como los controles remotos usan radiación infrarroja (y no ondas de radio), no se escuchará interferencia alguna.

IMPLEMENTACIÓN

- Explica en qué consiste la interferencia. Considera las dos acepciones dadas en el texto. Puedes hacer las siguientes actividades:
- Usa una cubeta con agua o un láser atravesando una doble rendija (láminas 11 y 12).
- Una vez que los estudiantes realicen la actividad, es conveniente que discutan sus respuestas.

RESPUESTAS A PREGUNTAS EN PÁGINA ANTERIOR:

1. 0,013 arcosegundos.
2. Es mejor que la resolución del telescopio espacial Hubble en ondas visibles.
3. Mediante dos camiones diseñados especialmente para esta tarea. Se llaman Otto y Lore.



Actividad 8

Variación de la presión atmosférica con la altura

Aprende a calcular la escala de altura

A grandes alturas la presión atmosférica es menor que la medida a nivel del mar, así como también lo es la cantidad de oxígeno disponible. En esta actividad, examinaremos cómo la presión atmosférica en ALMA se compara con la del nivel del mar y con otros lugares ubicados a gran altitud.

OBJETIVO: Utilizar un modelo simple para estudiar la variación de la presión atmosférica con la altura.

LLANO DE CHAJNANTOR

ALMA fue construido a una altitud de 5.000 metros en el llano de Chajnantor, en lo que se denominó Sitio de Operaciones del Conjunto (AOS, por su sigla en inglés). Las condiciones allí pueden ser excelentes para la astronomía sub-milimétrica, pero son bastante duras para trabajar y vivir. Debido a esto, las operaciones cotidianas son conducidas desde un lugar más bajo, a 2.900 metros de altitud, donde se ubican las instalaciones del Centro de Apoyo a las Operaciones (OSF).

PRESIÓN ATMOSFÉRICA: UN MODELO ISOTÉRMICO

Podemos utilizar un modelo simple para estudiar la forma en que la presión atmosférica disminuye con la altitud asumiendo que la presión cae exponencialmente al aumentar la altura. Este modelo es descrito como isotérmico ya que asumimos que la temperatura del aire permanece constante. Esto no es totalmente exacto, pero es una aproximación razonable.

Si p representa la presión como una función de la altura h sobre el nivel del mar y p_0 es la presión a nivel del mar (es decir, $h = 0$ metros), entonces,

$$p(h) = p_0 e^{-h/H}$$

donde H es la altura donde la presión ha caído por un factor de $1/e$ (37% aprox.) y es conocida como la escala de altura de la atmósfera.

A nivel del mar la presión atmosférica es cercana a los 100 kPa y la escala de altura es de 8.400 metros aproximadamente.

APLICA

- Se puede calcular la escala de altura para distintos lugares, que no necesariamente corresponden a los 8.400 metros. Por ejemplo, en la cima del monte Everest, con una altura $h = 8.848$ metros, la presión medida es de 33 kPa aproximadamente. ¿cuál es la escala de altura H en este caso?
- Considerando una escala de altura de 8.400 metros, estima la presión atmosférica en las alturas geográficas del OSF y AOS de ALMA. Compara la presión atmosférica en el AOS de ALMA y el nivel del mar.
- La cantidad de oxígeno disponible se relaciona con la presión atmosférica, ¿qué porcentaje aproximado del oxígeno a nivel del mar, se encuentra en el AOS de ALMA? Investiga qué riesgos se corren por trabajar en condiciones con poco oxígeno.



Actividad 8

Variación de la presión atmosférica con la altura

Nota docente

Esta actividad permite a los estudiantes utilizar un modelo simple para estimar la variación de la presión atmosférica con la altura. Se introduce el concepto de escala de altura y su dependencia del lugar donde se usa el modelo.

PREPARACIÓN

Identifica las imágenes relacionadas a esta actividad (láminas 15, 16 y 17).

Visita la sección "Ubicación" en el sitio web de ALMA (www.alma.cl) y verifica el acceso a los sitios nombrados a través de Google Maps.

IMPLEMENTACIÓN

- Explica que son el AOS y el OSF del telescopio ALMA, muéstrales los sitios geográficos a través de Google Maps, o pide a los alumnos que los busquen en la misma aplicación, identificando latitud, longitud y altura.
- Resume con los estudiantes las características principales de la atmósfera. Define la unidad de presión $\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$
- Explica la ecuación del modelo. Resalta la importancia del número e en las matemáticas y las ciencias y cómo aparece frecuentemente en diversos procesos naturales.
- Explica el significado de $1/e$ en general como el 37% del valor inicial.
- Discute con los estudiantes hasta qué punto parece razonable considerar un modelo isotérmico.
- Solicita que realicen las aplicaciones. En el caso de la investigación, define su extensión, pero explicita que deban utilizar fuentes que sean confiables y que las listen en su trabajo.

LA ATMÓSFERA TERRESTRE

La atmósfera es la capa de gas que rodea la Tierra y que es retenida por la gravedad. Se compone de varios gases, principalmente Nitrógeno, Oxígeno, Dióxido de Carbono, Vapor de agua, entre otros.

Se reconocen varias capas en la atmósfera, siendo la troposfera la que mantiene la mayoría de la masa (75%), y que se ubica por debajo de los 11.000 metros de altitud. En esta capa la temperatura decrece con la altura.

En general la presión depende de la temperatura y de la altura. Pero los datos observados de la presión pueden ser modelados adecuadamente mediante un modelo isotérmico. En éste se considera que la temperatura promedio es de 300 K, lo que es consistente con varias observaciones. Claramente este modelo no explica las variaciones de temperatura en la troposfera, que es de $-6,5\text{ °C/km}$, para lo que es necesario refinar el modelo.

RESPUESTAS

1. ¿Cuál es la escala de altura H en este caso?

En este caso la escala de altura para el monte Everest es de 7980 m.

2. Estima la presión en cada sitio.

La presión para el OSF es 71 kPa y para el AOS es de 55 kPa. Para este último la presión es casi la mitad que la que se encuentra a nivel del mar.

3. ¿Cuál es el porcentaje de oxígeno?

Es casi la mitad de todo el oxígeno disponible a nivel del mar. En alturas extremas, existe el riesgo de ser afectado por enfermedades relacionadas a la altura e incluso el riesgo de muerte. Debido a lo anterior, los trabajadores de ALMA sólo se trasladan al Sitio de Operaciones del Conjunto (5.000m) cuando es estrictamente necesario.

Actividad 9

Observando a través de la atmósfera

Identifica qué factores influyen en la opacidad / transparencia

ALMA fue construido a 5.000 metros de altitud en el llano de Chajnantor, en los Andes chilenos. Allí, en la árida zona de Atacama, podemos encontrar las condiciones de altura y sequedad necesarias para realizar astronomía submilimétrica.

OBJETIVO: Identificar los factores que afectan la opacidad de la atmósfera para determinadas longitudes de onda.

OBSERVANDO A TRAVÉS DE LA ATMÓSFERA

La habilidad de la radiación electromagnética para atravesar la atmósfera terrestre depende en gran medida de su longitud de onda. Esto es medible en términos de la transparencia u opacidad atmosférica. Una opacidad del 100% corresponde a una transparencia del 0% y viceversa. A una opacidad del 100%, la radiación es bloqueada completamente, mientras que a una opacidad del 0%, la radiación es transmitida por completo.

La atmósfera no sólo absorbe las débiles señales del espacio que los astrónomos buscan recolectar con ALMA, sino que también emite radiación por sí misma.

El factor principal para las longitudes de onda de ALMA es el vapor de agua. Es por esto que es tan importante un sitio alto y seco. La cantidad de vapor de agua es generalmente medida en milímetros de vapor de agua precipitable (pww), que corresponde a la profundidad del charco que se formaría sobre un lugar si toda el agua se precipitara en forma de lluvia.

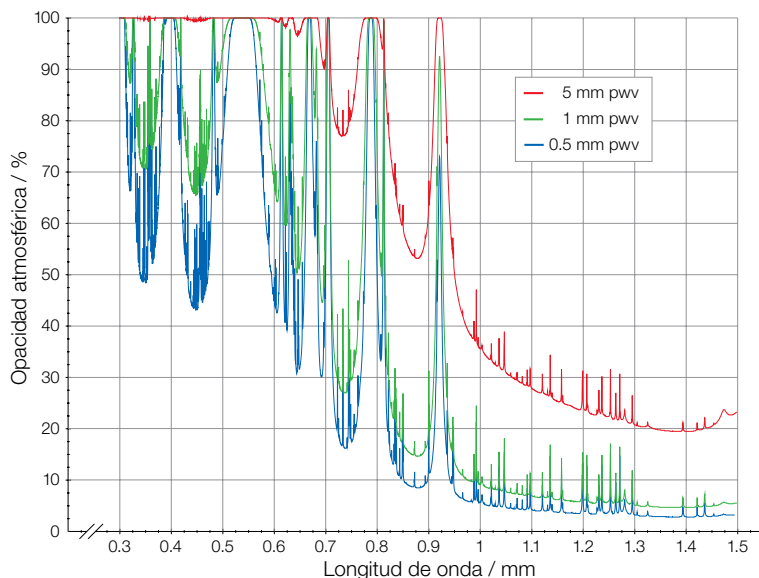
El valor promedio en el planeta es cercano a los 2,5 cm, pero para la astronomía submilimétrica se necesitan condiciones de sequedad extrema.

En Chajnantor, durante el periodo comprendido desde abril hasta diciembre, la mediana de vapor de agua es de aproximadamente 1 mm, y puede descender a menos de 0,5 mm en condiciones de sequedad particulares.

APLICA

Responde de acuerdo al gráfico:

1. ¿Cómo cambia la opacidad a medida que aumenta la cantidad de vapor de agua?
2. ¿Cómo cambia la opacidad, hablando en términos generales, a medida que la longitud de onda se vuelve más corta?
3. En longitudes de onda más largas, tales como 1,2 mm, ¿qué tan crítico es tener niveles más bajos de vapor de agua? Puede ser útil comparar qué porcentaje de luz es transmitido (toma 100% y réstale el porcentaje de opacidad), a 5 mm de pww y a 0,5 mm de pww. ¿Qué sucede a longitudes de onda más cortas, tales como 0,35 mm?



Actividad 9

Observando a través de la atmósfera

Nota docente

Esta actividad permite a los estudiantes reconocer la importancia del factor vapor de agua en la opacidad de la atmósfera y la relación con la longitud de onda de la radiación observada proveniente de un objeto en el Universo.

PREPARACIÓN

Identifica las imágenes relacionadas a esta actividad (láminas 18 y 19).

IMPLEMENTACIÓN

Muestra a los estudiantes la imagen de la lámina 18. Analiza la información que incluye: longitud de onda y opacidad. Realiza preguntas tales como: ¿a qué longitud es más opaca o transparente?, ¿en qué rango se encuentra la mayor transparencia?, etc.

Discute el segundo gráfico y solicita que identifiquen las variables.

Solicita que realicen los ejercicios y luego discutan resultados.

RESPUESTAS

1. ¿Cómo cambia la opacidad a medida que la cantidad de vapor de agua aumenta?

La opacidad aumenta.

2. ¿Cómo cambia la opacidad, hablando en términos generales, a medida que la longitud de onda se vuelve más corta?

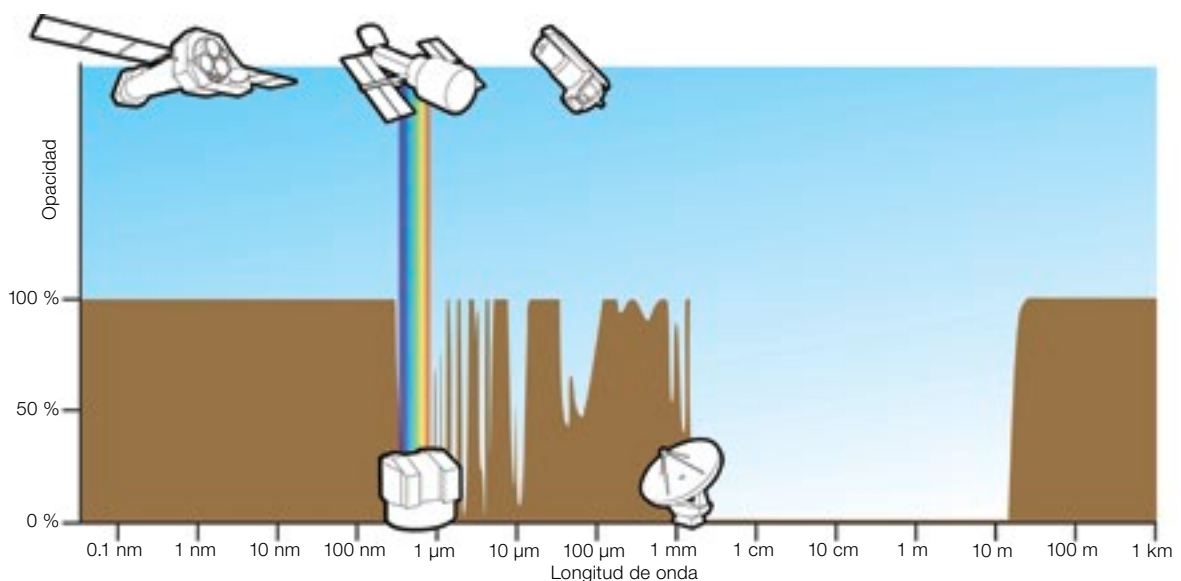
La opacidad aumenta (aunque hay "ventanas", zonas del espectro en que la opacidad no es tan alta).

3. ¿Qué tan crítico es tener niveles más bajos de vapor de agua? ¿Qué sucede a longitudes de onda más cortas, tales como 0,35 mm?

En longitudes de onda más cortas, es crítico tener niveles bajos de vapor de agua. En longitudes de onda más largas, la opacidad es relativamente baja incluso con altos niveles de vapor de agua.

OPACIDAD ATMOSFÉRICA

En el gráfico de arriba, el nivel de la curva café representa qué tan opaca es la atmósfera en la longitud de onda dada. Las ventanas más grandes se encuentran en las longitudes de onda visibles (marcadas por un arcoíris) y en las longitudes de onda de radio desde aproximadamente 1 mm hasta 10 m. ALMA opera en una región límite, donde la opacidad depende fuertemente de cuán alto y seco es el lugar.



Actividad 10

Ley de reflexión

El plato de los radiotelescopios tiene una forma determinada que permite dirigir las ondas captadas a un punto determinado, llamado punto focal.

OBJETIVO: Aplicar la ley de reflexión de espejos planos para explicar la existencia de un punto focal en un espejo parabólico.

ESPEJOS PLANOS

En un espejo plano, el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, medidos desde la normal, que es la línea perpendicular al plano del espejo (Ver imagen superior derecha).

MATERIALES

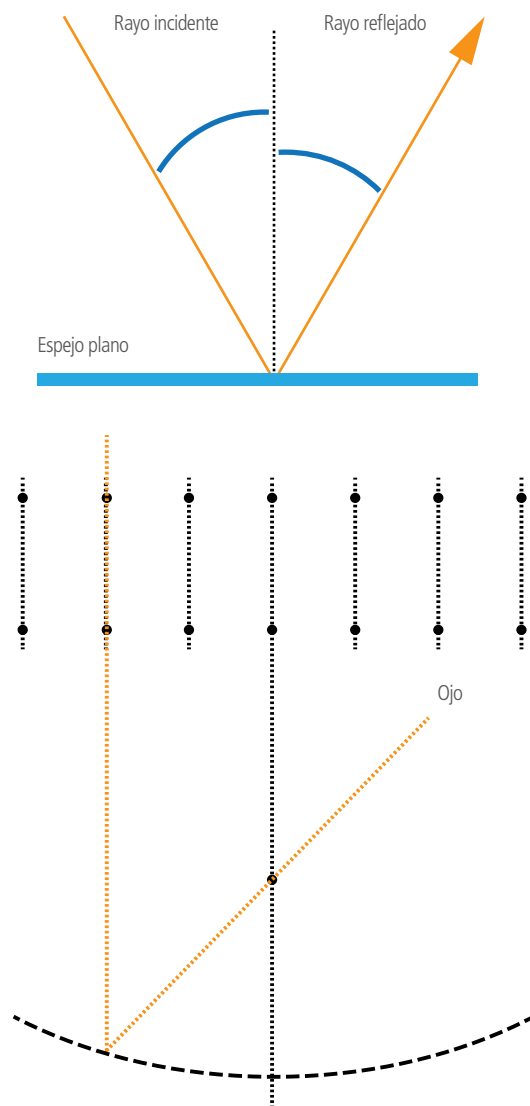
- 7 espejos pequeños (2x3 cm)
- Un trozo de plumavit de alta densidad, tamaño carta
- Plasticina
- Cinta adhesiva
- 15 alfileres con cabeza

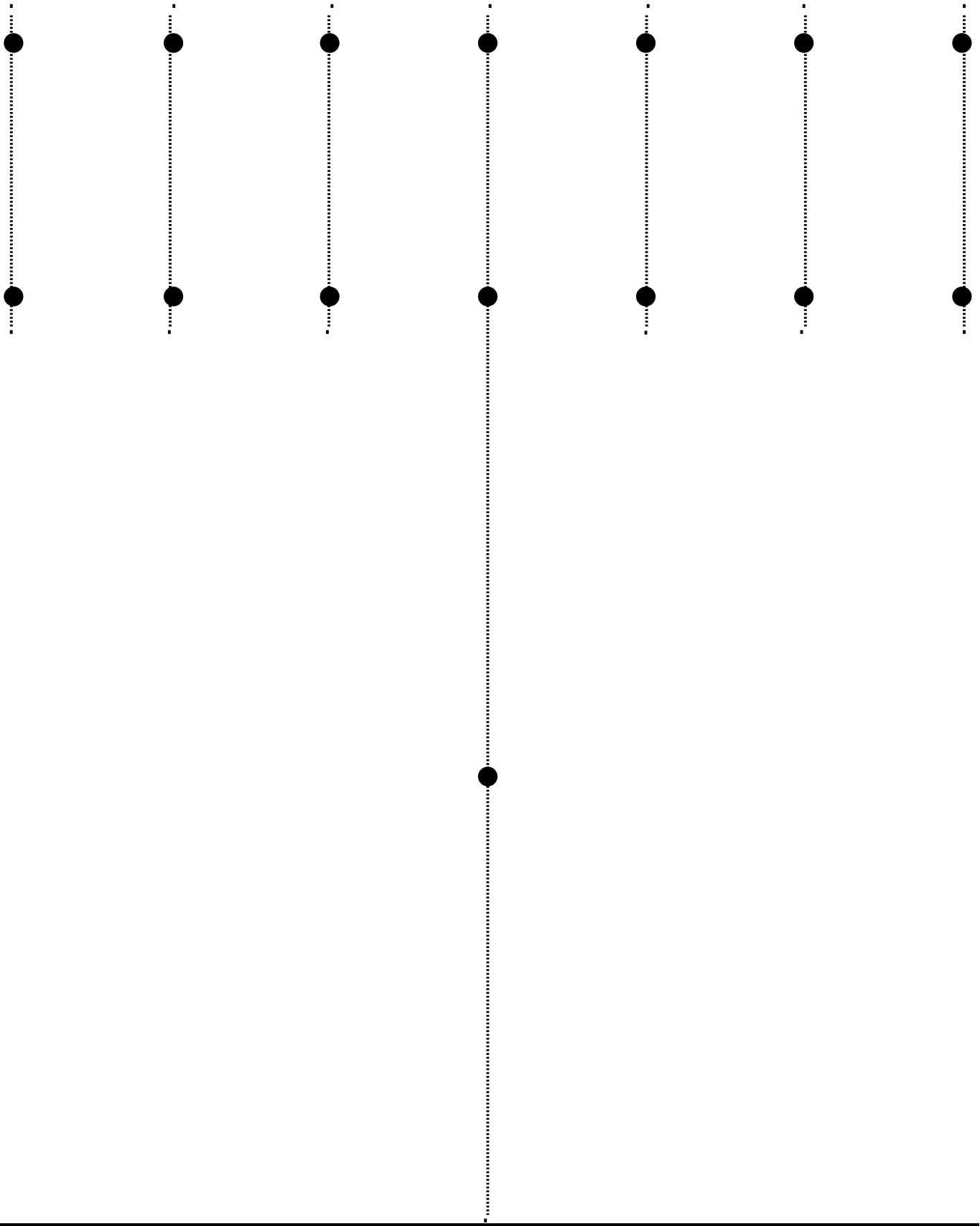
PROCEDIMIENTO

1. Imprime copias de la imagen inferior derecha -que está también en la página siguiente- y entrégaselas a los alumnos para que la pongan sobre el plumavit, formando una base.
2. Pincha los alfileres en los puntos marcados en el papel
3. Con un trozo de cinta, une los espejos por su parte opaca.
4. Pon un poco de plasticina en cada espejo, para que se paren de manera vertical sobre la base.
5. Gira cada uno de los espejos, de forma que el alfiler central obstruya a los otros dos.
6. Con cuidado dibuja una línea en el papel que pasa por los espejos.

RESPONDE

1. ¿Dónde se ubica el foco?
2. Comprueba que la línea dibujada es una parábola.
3. ¿Cuál es la diferencia entre tener varios espejos planos y uno solo parabólico?
4. Discute un procedimiento para diseñar una parábola que pueda ser usada para construir una antena de 2 metros de diámetro.





Actividad 10

Ley de reflexión

Nota docente

Esta actividad permite a los estudiantes aplicar la ley de reflexión para comprender cómo funciona un espejo parabólico.

PREPARACIÓN

Reúne los materiales necesarios, se recomienda que los espejos sean del tamaño de 2x3cm, en caso de tener otro tamaño, será necesario corregir el patrón. Esta actividad puede ser individual o en parejas.

IMPLEMENTACIÓN

- Entrega la guía de trabajo y los materiales.
- Demuestra la ley de reflexión, puede ser útil un puntero láser.
- Verifica que realicen los pasos necesarios, ayuda para que la curva obtenida sea suave.
- Discute las respuestas con el curso, incentiva soluciones creativas para el desarrollo del procedimiento de la pregunta 4 y que sean prácticas.

RESPUESTAS

1. ¿Dónde se ubica el foco?

En el alfiler central

2. Comprueba que la línea dibujada es una parábola.

Se mide la distancia entre el foco y el espejo, y se compara con la distancia entre el espejo y la directriz medida a través de la línea punteada.

3. ¿Cuál es la diferencia entre tener varios espejos planos y uno solo parabólico?

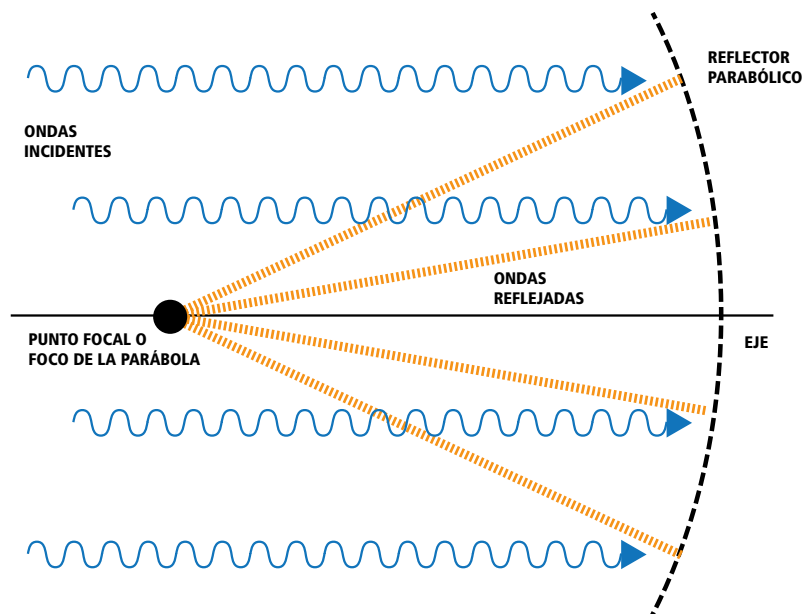
Los espejos planos reflejan la luz en la misma dirección que el haz de luz incidente. Por el contrario, los espejos parabólicos convergen la luz incidente en un solo punto, cuya dirección es diferente a la incidente.

4. Discute un procedimiento para diseñar una parábola que pueda ser usada para construir una antena de 2m de diámetro.

El proceso de desarrollo a partir de la definición de parábola, se espera que los estudiantes puedan definir el procedimiento tecnológico de construcción.

PARÁBOLA

Corresponde al lugar geométrico de los puntos de un plano que equidistan de una recta dada, llamada directriz, y de un punto exterior a ella, llamado foco. (Lámina 20)



5. Glosario



Una antena ALMA por primera vez en camino al Llano de Chajnantor. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), R. Bennett

Antena

Dispositivo metálico utilizado para emitir o captar ondas de radio. En el caso de los radiotelescopios como ALMA, solo captan ondas de radio. Tienen diversas formas y tamaños y son utilizadas por diversos dispositivos tales como celulares, radios, televisión, Internet inalámbrica, entre otros.

Banda de frecuencia

Son intervalos del espectro electromagnético determinados por sus frecuencias. Tienen especial uso en las radiocomunicaciones. El uso lo regula la Unión Internacional de Telecomunicaciones. La organización define usos comunes a las bandas como la radiodifusión o la telefonía móvil. Por ejemplo, la banda de VHF (*Very High Frequency*) que va desde 30 a 300 MHz, se usa para la radio FM, la televisión, telefonía celular y también por radioaficionados. Otra banda es la UHF (*Ultra High Frequency*) de 300 a 3000 MHz, donde se encuentran las microondas, radioastronomía, redes inalámbricas, el bluetooth, entre otras. ALMA funciona en la banda EHF (*Extremely High Frequency*) y THz (*TeraHertz Frequency*). En ALMA se observará en 10 bandas de frecuencia distintas.

Banda de onda corta

La onda corta o banda de onda corta, es una [banda de frecuencia](#) que se encuentra entre los 3 y 30 MHz. Usada principalmente por las emisoras de radio que transmiten a nivel internacional, estas ondas son reflejadas por la ionosfera.

Cinturón de Kuiper

Se denomina de esta forma al conjunto de cuerpos que orbitan alrededor del Sol a una distancia entre 30 y 50 [Unidades Astronómicas](#). Su existencia fue predicha por Gerard Kuiper en 1960, y los objetos que lo componen poseen tamaños de entre 1 y 3000 kilómetros de diámetro.

Color

Es la percepción visual que se genera en el cerebro del ser humano, al interpretar las señales nerviosas provenientes de los receptores fotónicos ubicados en la retina y que detectan y distinguen las diversas longitudes de onda del espectro visible.

Constelación

En Astronomía, una constelación es una agrupación de estrellas que se establece por convenciones arbitrarias o culturales. La mayoría de las civilizaciones humanas han agrupado estrellas y las han nombrado según sus mitos o creencias. Las constelaciones más conocidas provienen de la antigua Grecia, y representan diversos mitos.

Cuanto

Del latín Quantum: cantidad de algo, corresponde a una unidad mínima de una magnitud o una mínima variación en los inicios de la teoría cuántica. Se afirmaba que la carga eléctrica estaba cuantizada, pues todas las cargas medidas corresponden a una cantidad entera de la carga del electrón.

Diagrama de Hertzsprung-Russell

Abreviado comunmente como Diagrama H-R, es un diagrama que muestra la relación entre la magnitud absoluta y la temperatura de una estrella. Realizado por el astrónomo Ejnar Hertzsprung en 1905 y de manera independiente por Henry Russell en 1913, el diagrama se utiliza para estudiar la evolución estelar.

Eclíptica

La eclíptica es la línea que parece recorrer el Sol en la esfera celeste. Es un movimiento aparente, pues es la Tierra la que se mueve alrededor del Sol. Su nombre proviene del griego ἐκλειπτική (ekleiptiké), relativo a los eclipses.

Frecuencia

La frecuencia es el número de veces que oscila una onda en una unidad de tiempo. Se relaciona con la longitud de onda a partir de la siguiente fórmula: frecuencia = velocidad de la luz / longitud de onda. Es decir, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa.

Fuerza de Lorentz

Es la fuerza ejercida por el campo magnético B sobre una partícula cargada que se mueve a una velocidad v . La fuerza es perpendicular al plano formado por el vector de campo magnético y la velocidad, cuyo modulo se determina a partir de la expresión: $F=qvB \sin(\theta)$, donde θ es el ángulo entre la velocidad y el campo B , esto implica que la fuerza magnética sobre una carga estacionaria o una carga moviéndose paralela al campo magnética es cero. La dirección de la fuerza se obtiene por la regla de la mano derecha o del tornillo derecho: usando la mano derecha, los dedos se cierran como rotando el vector velocidad hacia el vector B , donde el pulgar entrega la dirección y sentido de la fuerza.

Hertz

Es la unidad de frecuencia en el Sistema Internacional, equivale a un ciclo por cada segundo transcurrido. $1\text{GHz} = 10^9$ y $1\text{MHz} = 10^6$ ciclos por segundo.

Isotérmico

Se refiere a un cuerpo a temperatura estable y uniforme.

Jansky (Jy)

Es la unidad de densidad de flujo espectral, que lleva el nombre de Karl G. Jansky. Esta unidad no es parte del Sistema Internacional de Unidades. Equivale a $10^{-26} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$. Se utiliza para medir radiación electromagnética de fuentes puntuales, y surge en el ámbito de la radioastronomía. Para tener una noción de esta unidad, las fuentes de radio más brillantes en el cielo tienen densidades de 1 a 100 Jy.

Kelvin (K)

Unidad de temperatura absoluta. El tamaño de su unidad equivale al grado centígrado, mientras que su cero equivale a $-273,5 \text{ }^\circ\text{C}$. En esta unidad no se utiliza el símbolo de grado $^\circ$, mientras que su plural tampoco cambia, ejemplo: 100 K.

Ley de Stefan-Boltzmann

Ley que relaciona la temperatura de la superficie de un cuerpo con la energía radiada por él.

Ley de Wien

Ley que relaciona la temperatura con la longitud de onda a la que se produce la emisión máxima de radiación de un cuerpo negro.

Longitud de onda

La longitud de onda es la distancia existente entre dos crestas de una onda electromagnética. Su valor está relacionado con la frecuencia: a mayor frecuencia, menor longitud de onda. La siguiente fórmula permite calcular la longitud de onda:

longitud de onda = velocidad de la luz / frecuencia.

Luz visible

Se llama luz visible a la parte del espectro electromagnético que puede ser percibida por el ojo humano. Contiene todos los colores del arcoíris.

Meridiano

Los meridianos son semicírculos máximos del globo terrestre, que pasan por los Polos Norte y Sur. Son líneas imaginarias que sirven para ubicarse en la superficie terrestre y determinar el huso horario. Puesto que son referenciales, es necesario acordar un meridiano cero. Desde 1884, éste corresponde al meridiano que pasa por el observatorio de Greenwich, cerca de Londres. El "meridiano local" es aquel que pasa por el lugar donde se sitúa el observador.

Microonda

Son ondas electromagnéticas que se encuentran en el rango que va de los 300 MHz a los 300 GHz. Abarcan las bandas de radiofrecuencia UHF, SHF y EHF. Además de las comunicaciones, se usa cotidianamente para calentar alimentos que tienen contenido de agua, pues microondas de frecuencias de 2,45 GHz son capaces de excitar a éstas moléculas, aumentando la temperatura del alimento.

Nanómetro

Es una unidad de longitud que equivale a una mil millonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

Onda electromagnética

Las ondas electromagnéticas son aquellas ondas que no necesitan de un medio material para propagarse. En el vacío todas se propagan a una velocidad constante de 300.000 km/s, independiente de la velocidad a la que se mueva la fuente que las genera. Incluye a la luz visible, las ondas de radio, los rayos X, rayos gamma, entre otros. Las ondas son producidas por el movimiento acelerado de partículas cargadas, que generan un campo eléctrico que se propaga en el espacio.

Plano de la eclíptica

El plano de la [eclíptica](#) corresponde al plano medio de la órbita de la Tierra en torno al Sol. El plano del Ecuador terrestre se encuentra inclinado $23^{\circ} 27'$ respecto del plano de la eclíptica.

Presión (Pascal, kPa)

Es la magnitud física que mide la fuerza aplicada por unidad de superficie. En el Sistema Internacional, la presión se mide en pascales (Pa), unidad que equivale a 1 Newton actuando de manera uniforme sobre 1 metro cuadrado. También es común el uso de $kPa = 1000 \text{ Pa}$

Pulsar

Un pulsar o estrella pulsante es una estrella de neutrones que rota y emite un chorro de radiación electromagnética. Esta radiación puede ser solamente observada cuando el chorro apunta hacia la Tierra. Así como un faro puede ser solamente visto cuando su luz apunta en la dirección del observador, y esto es responsable de apariencia "pulsante" de la emisión. El primer pulsar fue descubierto por Bell y Hewish en 1967, y la señal detectada tenía un período de casi 1,33 segundos. Estos científicos pensaron originalmente que habían descubierto la existencia de seres extraterrestres, por lo que denominaron a esta fuente LGM (*Little Green Men* u hombreritos verdes).

Punto focal

Las ondas de radio provenientes de un objeto celeste específico son redirigidas por el reflector de un radiotelescopio hacia su punto focal, donde se encuentra el receptor que capta dichas ondas.

Radiación electromagnética

Ver definición de Onda electromagnética

Radiación óptica

Ver definición de Luz visible.

Radián

Es la unidad para medir un ángulo en el Sistema Internacional de Unidades. Se determina como el ángulo que subtiende un arco de circunferencia igual al radio de la misma.

Radioastronomía

Estudia el Universo analizando las ondas de radio en vez de la luz visible. Para esto se utilizan radiotelescopios, aparatos que son capaces de detectar las ondas de radio.

Radiofuente

Corresponde a un objeto del espacio exterior (por ejemplo estrellas, galaxias o polvo) que emite radiación electromagnética en la región de las ondas de radio. Estos objetos son estudiado por la radioastronomía. Jansky fue el primero -en 1931- en detectar estas ondas, provenientes del centro de la Vía Láctea.

Radiotelescopio

Los radiotelescopios captan las ondas de radio provenientes del Universo. Mientras los telescopios ópticos (diseñados para estudiar la luz visible) están equipados con un lente, los radiotelescopios tienen un reflector. El reflector redirige las ondas de radio provenientes del espacio hacia el receptor situado en su centro.

Rayos gamma

Radiación electromagnética de alta penetración y de menor longitud de onda que la luz visible. Los rayos gamma son producidos generalmente por la desintegración de elementos radiactivos, pero también en procesos subatómicos. Se considera una radiación ionizante, que puede causar daños importantes a las células y en particular a su núcleo. La mayor parte de los rayos gamma producidos en el espacio no logran llegar a la superficie de la Tierra, pues son absorbidos en la alta atmósfera.

Rayos X

Radiación similar a la radiación gamma, pero de mayor longitud de onda. Es también considerada radiación ionizante que por su alta penetración puede generar graves daños en el tejido vivo.

Reflector

El reflector es la parte del radiotelescopio que refleja las ondas de radio provenientes del Universo en el receptor situado en su centro.

Telescopio

Instrumento óptico que permite observar objetos lejanos, en particular objetos del cielo.

Unidades Astronómicas (UA)

Unidad de longitud que corresponde a la distancia media entre la Tierra y el Sol. Equivale aproximadamente a 150 millones de kilómetros.

Vía Láctea

Es la galaxia espiral donde se encuentra el Sistema Solar. Se estima que se compone de cerca de 300.000 millones de estrellas y tiene un diámetro de 100.000 años luz. De acuerdo a diversas observaciones, su morfología corresponde a una espiral barrada. Es parte del Grupo Local, que es un grupo de galaxias y otros objetos vinculados por la fuerza de gravedad, que incluye entre otros a Andrómeda, el Triángulo, las Nubes de Magallanes, las galaxias M32 y M110, y otros sistemas menores.

6. Láminas



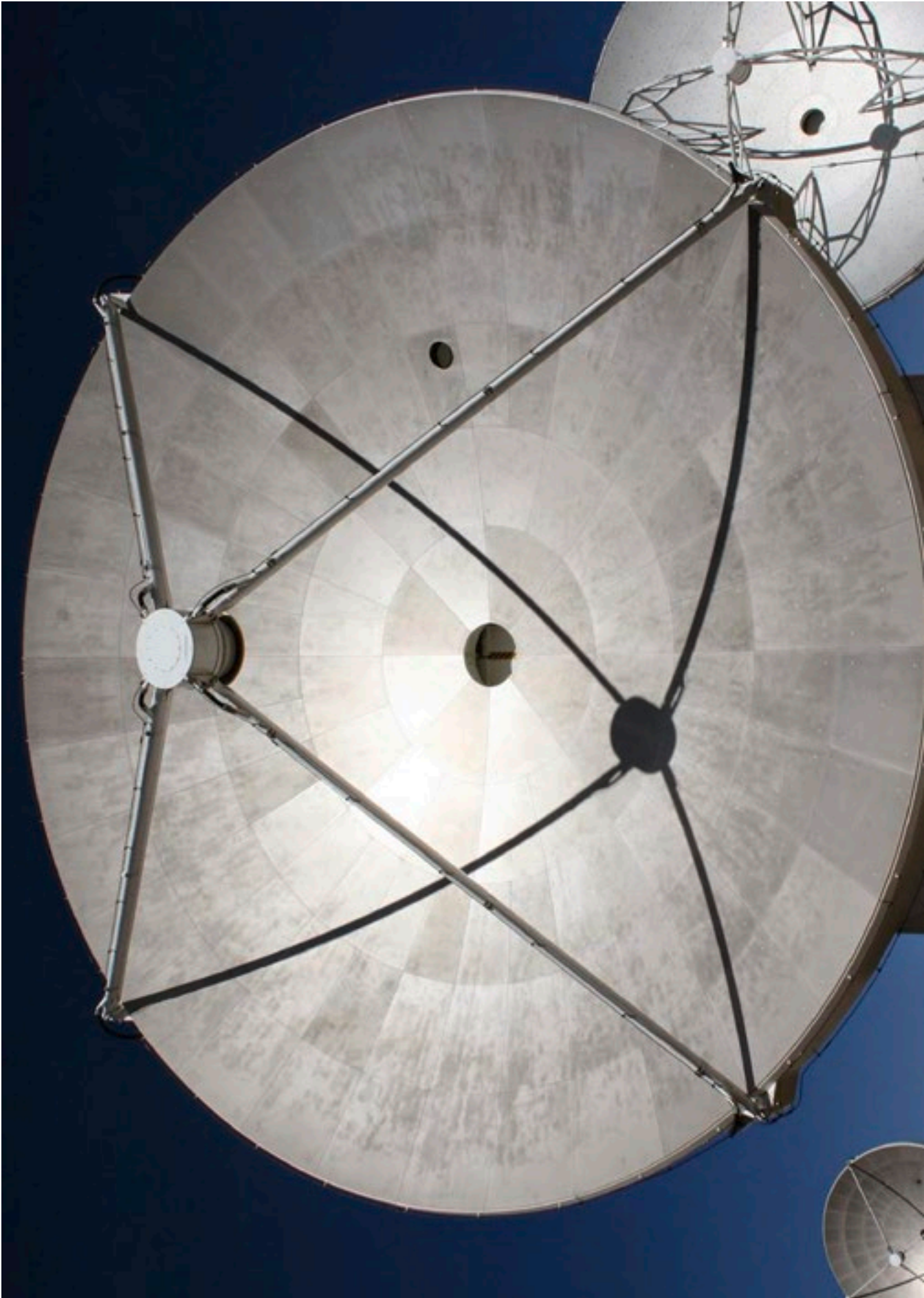


Lámina 1 | Reflector

La parte más visible de cada antena es el reflector (también llamado disco o plato). La mayoría de los reflectores de ALMA tiene un diámetro de 12 metros. Los reflectores tienen la misma función que el espejo de un telescopio óptico: captar la radiación proveniente de objetos astronómicos distantes y dirigirla hacia un detector que mide los niveles de dicha radiación.

Crédito: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)

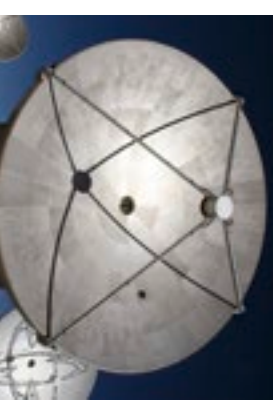




Lámina 2 | Reflector

El hecho de que los reflectores de ALMA sean paneles metálicos y no espejos se debe a la longitud de onda para las que están diseñados. Las superficies reflectantes de cualquier telescopio deben ser prácticamente perfectas, ya que cualquier imperfección levemente superior a la longitud de onda a ser captada impide que el telescopio obtenga datos correctos. Como las antenas de ALMA detectan longitudes de onda más largas que las de la luz visible, si bien tienen una precisión de hasta 25 micrómetros (mucho más fina que el espesor de una hoja de papel), no necesitan reflectores de espejo. Por lo tanto, aunque los reflectores de ALMA parezcan receptores satelitales gigantes, para un fotón con longitud de onda submilimétrica (partícula de luz) son superficies reflectantes casi perfectas y muy precisas.

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)





Front End



Receptores de banda



Lámina 3 | Front End

El sistema de Front End de ALMA es el primer elemento en una cadena compleja de recepción, conversión, procesamiento y grabación de señales. El Front End está diseñado para captar señales de diez bandas de frecuencia diferentes.

El Front End de ALMA es por lejos superior a cualquier sistema existente. De hecho, productos derivados de los prototipos de ALMA están llevando a sensibilidades mejoradas en observatorios milimétricos y submilimétricos existentes en todo el mundo. Las unidades del Front End se componen de numerosos elementos, producidos en distintos lugares en Europa, Norteamérica, Asia Oriental y Chile.

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

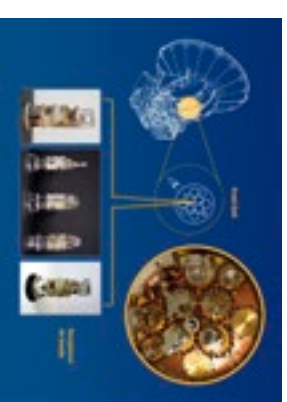




Lámina 4

Créditos: Wikimedia commons





Lámina 5 | Gramófono

Créditos: Wikimedia commons





Lámina 6 | Antenas de ALMA

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



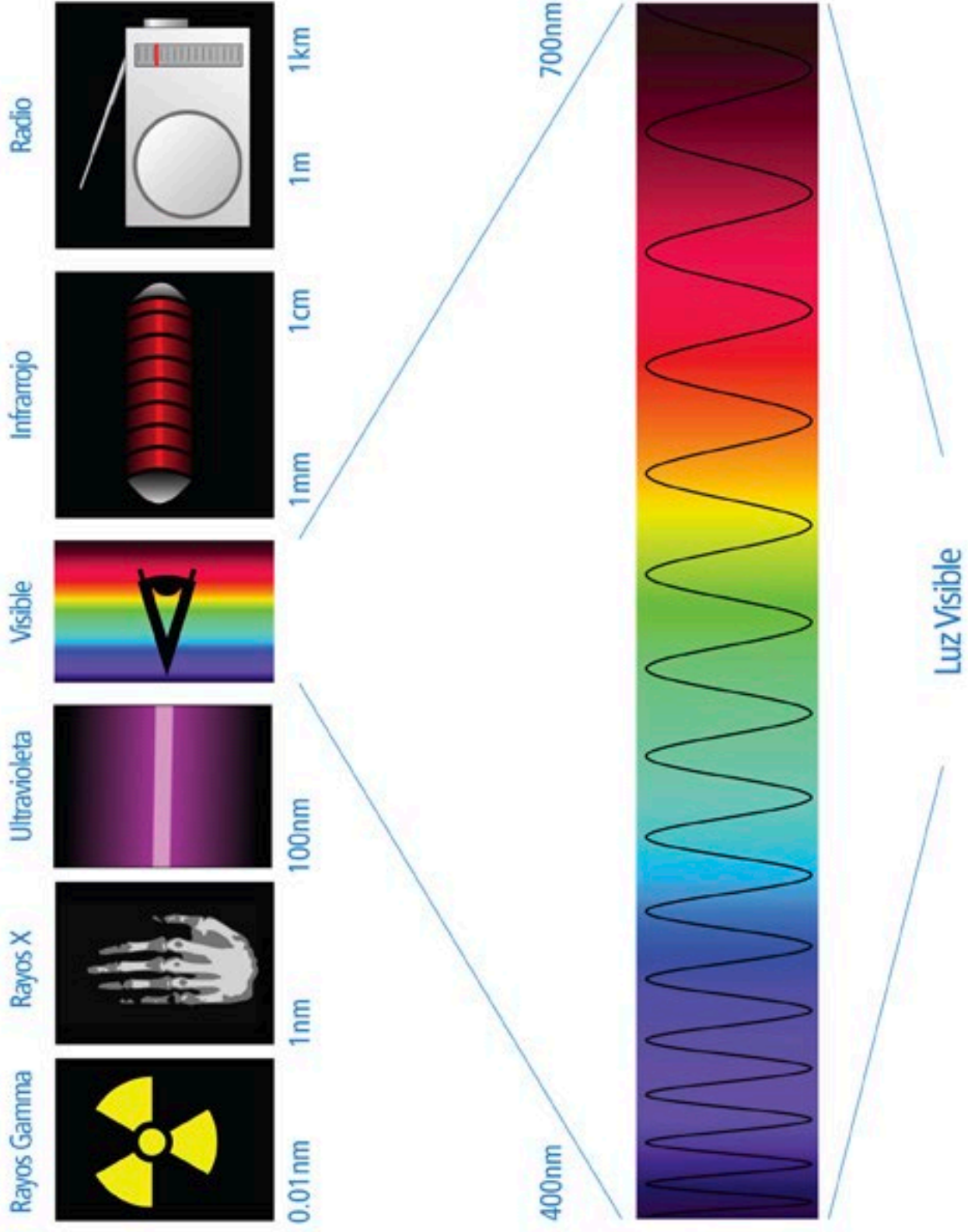
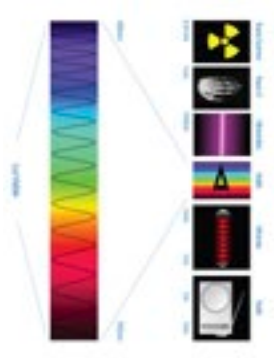


Lámina 7 | Espectro electromagnético

Espectro electromagnético, en el que se destaca el rango óptico o visible y aplicaciones para las diversas longitudes de onda.



Crédito: Tatoute. License: GNU.

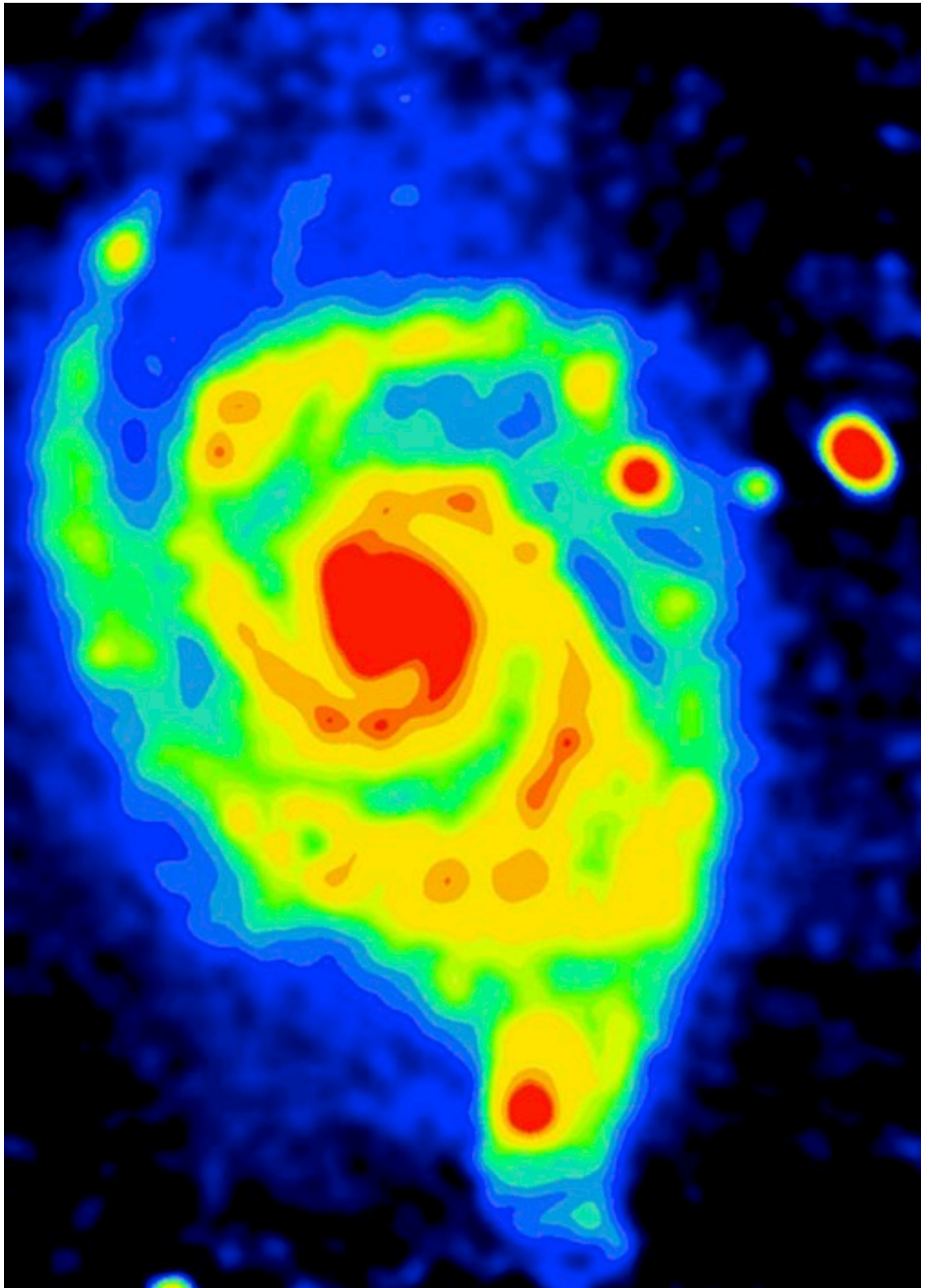
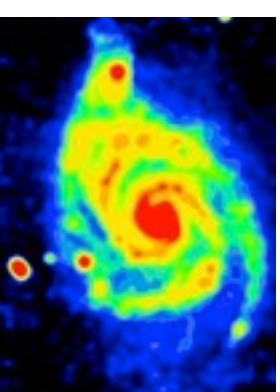


Lámina 8 | Galaxia espiral

Imagen de una galaxia espiral, tomada en el rango de rayos-X.

Créditos: NASA/Chandra



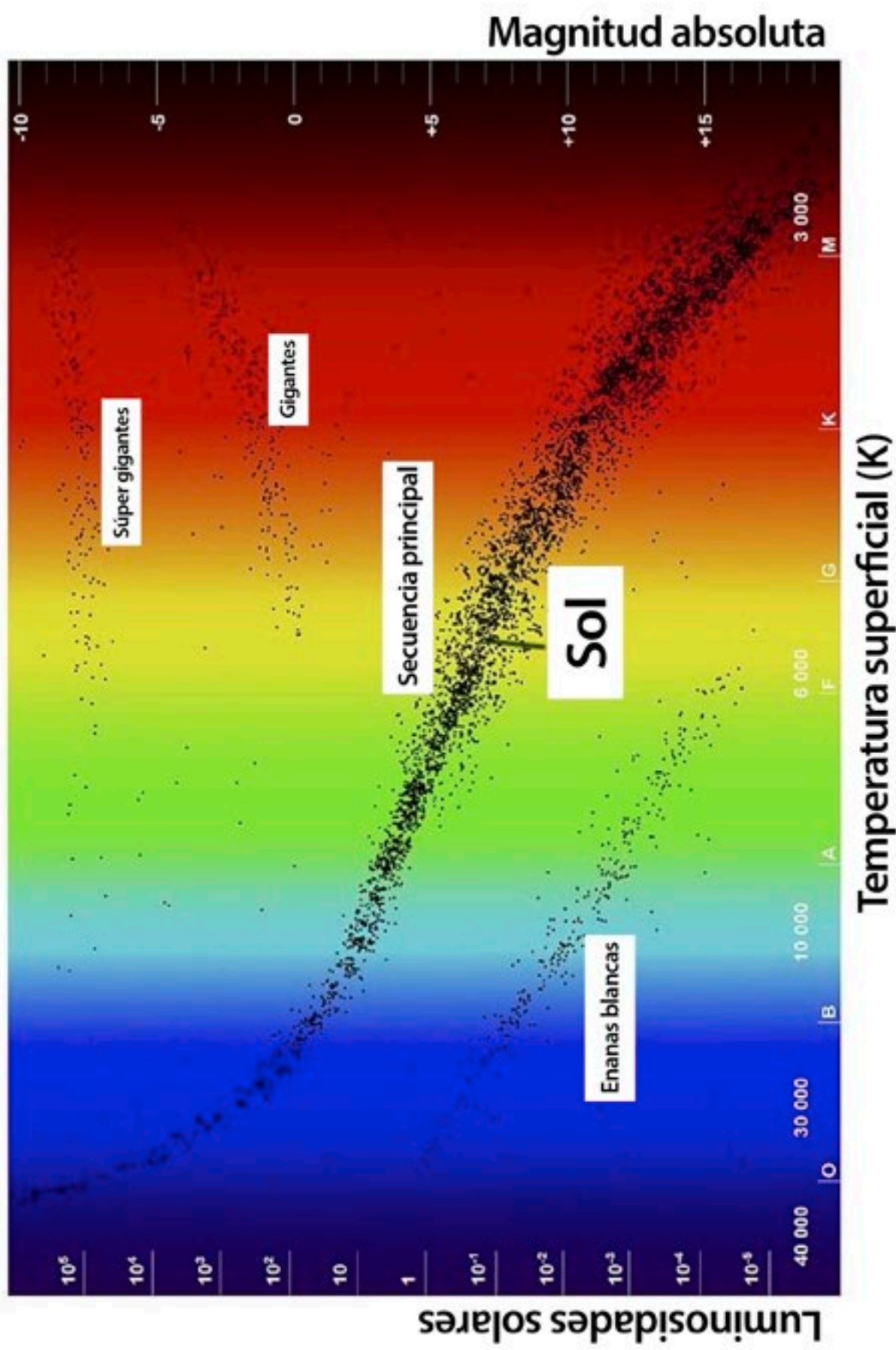
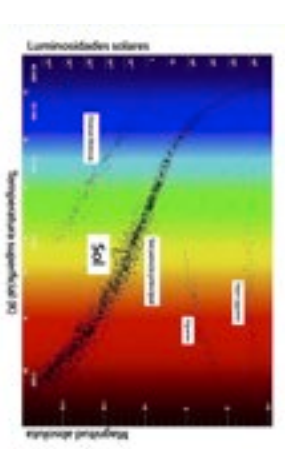


Lámina 9 | Diagrama de Hertzsprung–Russell

La imagen muestra el diagrama de Hertzsprung–Russell, que resume muchos de los conocimientos que tenemos de las estrellas hoy en día. Una de las cosas que podemos apreciar es justamente la relación entre la temperatura y el color de una estrella: así la superficie del Sol, con 5778 grados Kelvin de temperatura, brilla más fuertemente en las longitudes de onda que nuestros ojos ven como amarillo-verdoso, y que corresponde a unos 502 nanómetros (cifra 2000 veces más pequeña que un milímetro). Estrellas más frías son más rojas y las más calientes son azules.

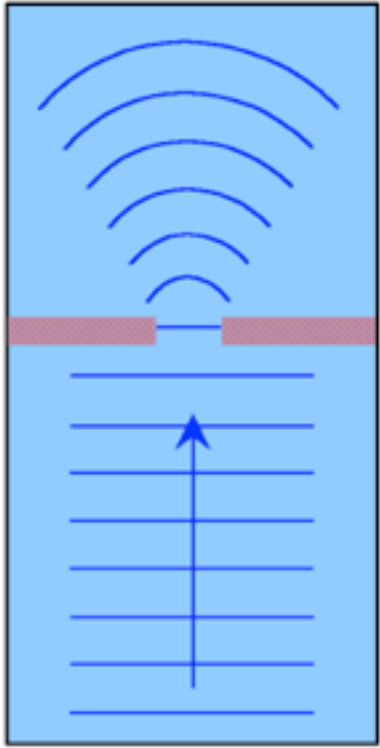
Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



1



2



3

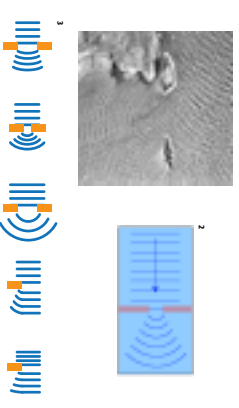


Lámina 10 | Difracción de ondas

1. Imagen aérea de ondas en el mar enfrentándose a obstáculos.
2. Frente de onda plano que enfrenta una rendija, donde se observa como la onda cambia de forma.
3. Variaciones de combinaciones de frentes de onda enfrentándose a un obstáculo, donde se observa los efectos del tamaño de la rendija en el efecto de difracción.

Créditos:

1. <http://www.gcsescience.com/Diffraction-Water-Waves.gif>
2. <http://johnvagabondscience.files.wordpress.com/2009/03/diffraction.jpg>



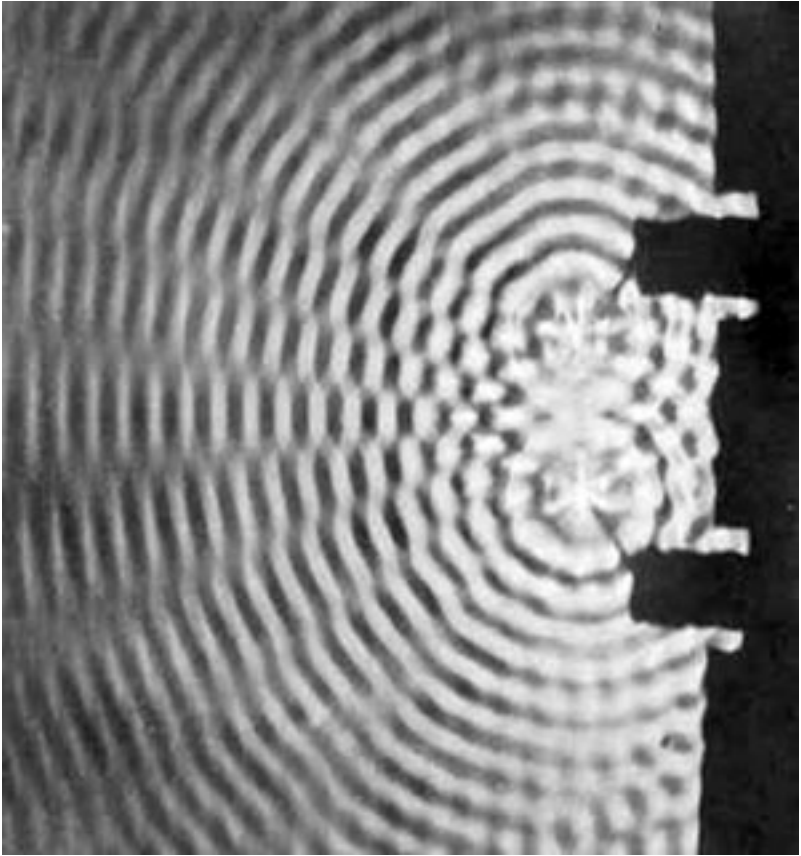
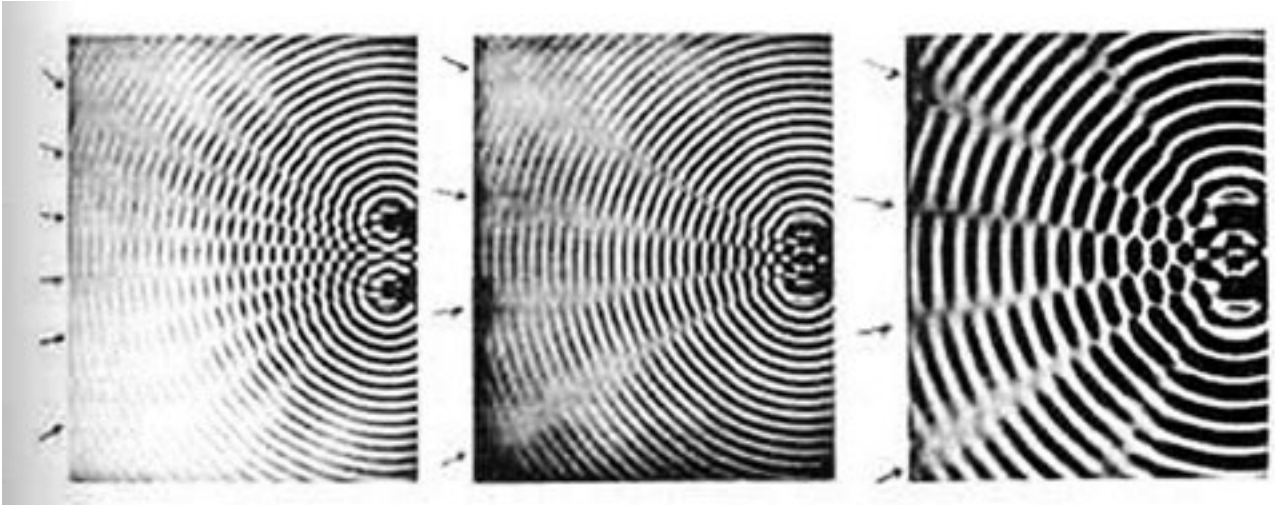
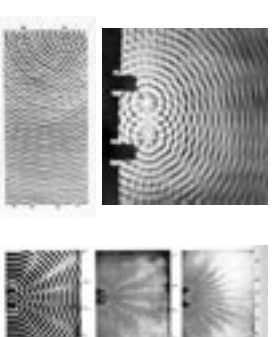


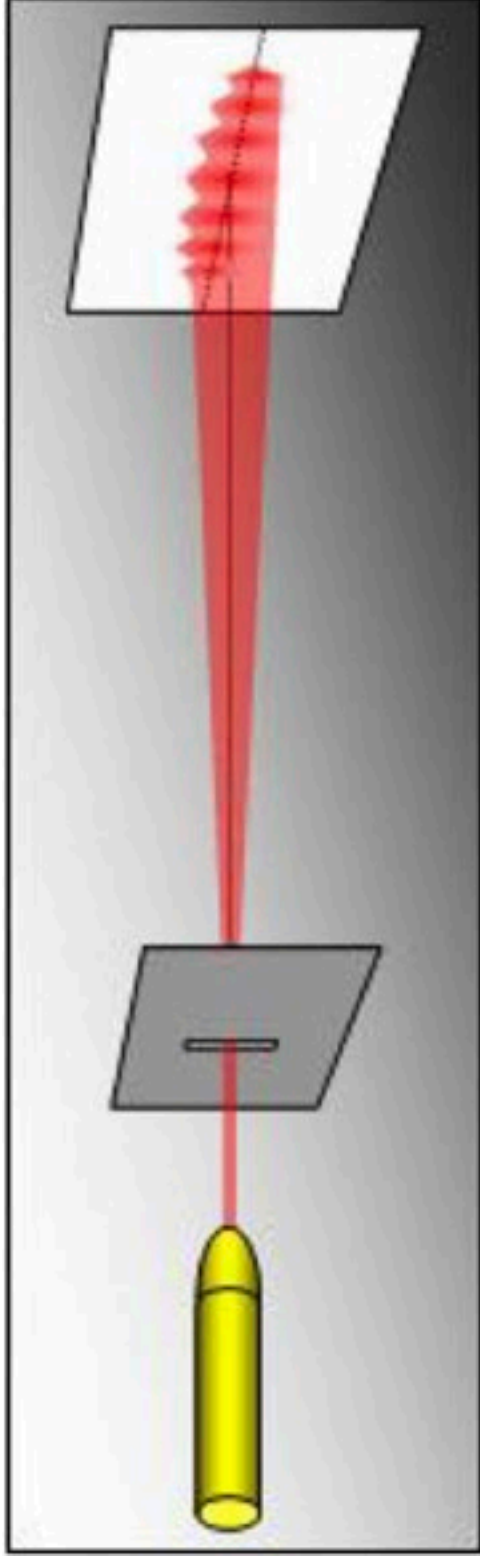
Lámina 11 | Interferencia en una cubeta de ondas

Imágenes obtenidas en una cubeta llena con agua a un nivel bajo, donde las ondas son generadas simultáneamente por dos puntas que entran en contacto con el agua.

Crédito: <http://www.aoc.nrao.edu/~myun/bob/tutorial.html>

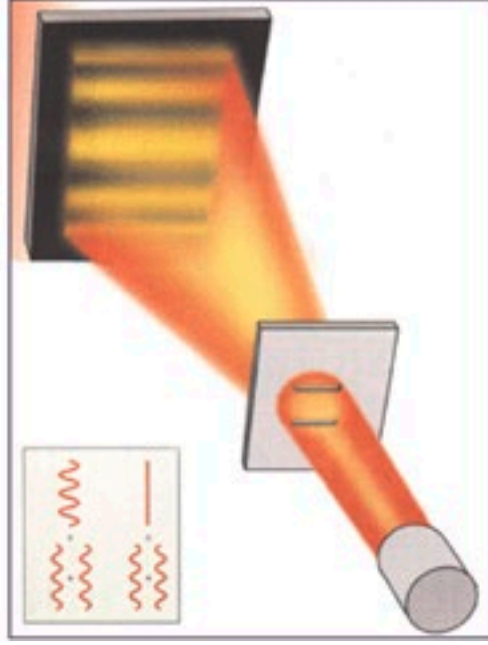


1



La luz del láser pasa por una rendija y se observa un patrón de difracción.

2



Experimento de Young:
La luz del láser pasa por dos rendijas finas y muy juntas entre sí, observándose un patrón de interferencia.

Lámina 12 | Interferencia luminosa

El haz del láser pasa a través de una rendija angosta, generando un patrón de difracción.

El mismo haz pasa por dos rendijas muy juntas y delgadas, el haz interfiere de la misma forma que lo hacen las ondas en la cubeta de ondas.

Créditos:

<http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=133072>

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/ekspong/

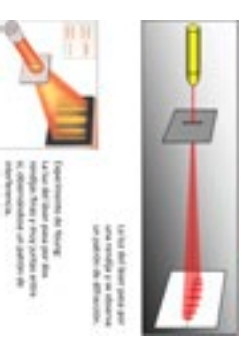




Lámina 13 | Transportador de antenas

Uno de los dos camiones transportadores de antenas de ALMA. Son conocidos como Otto y Lore y miden 20 metros de largo, 10 de ancho, 6 de alto y usan 28 ruedas

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



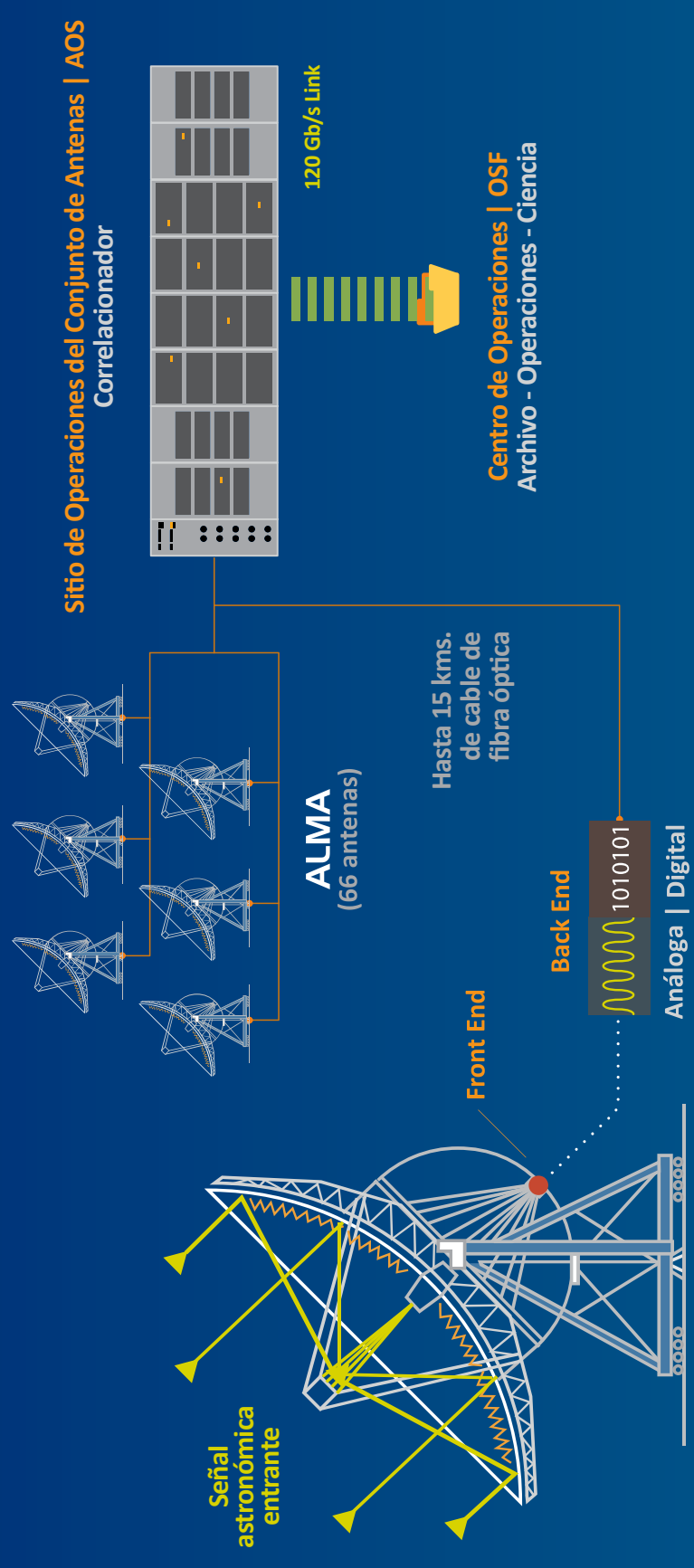
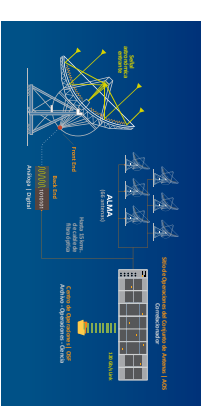


Lámina 14 | ¿Cómo funciona ALMA?

El sistema de Front End de ALMA es el primer elemento en una cadena compleja de recepción, conversión, procesamiento y grabación de señales. La información es conducida al Back End que digitaliza la información que es procesada en el Correlacionador, desde el que se obtiene la información que será utilizada por los astrónomos.

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



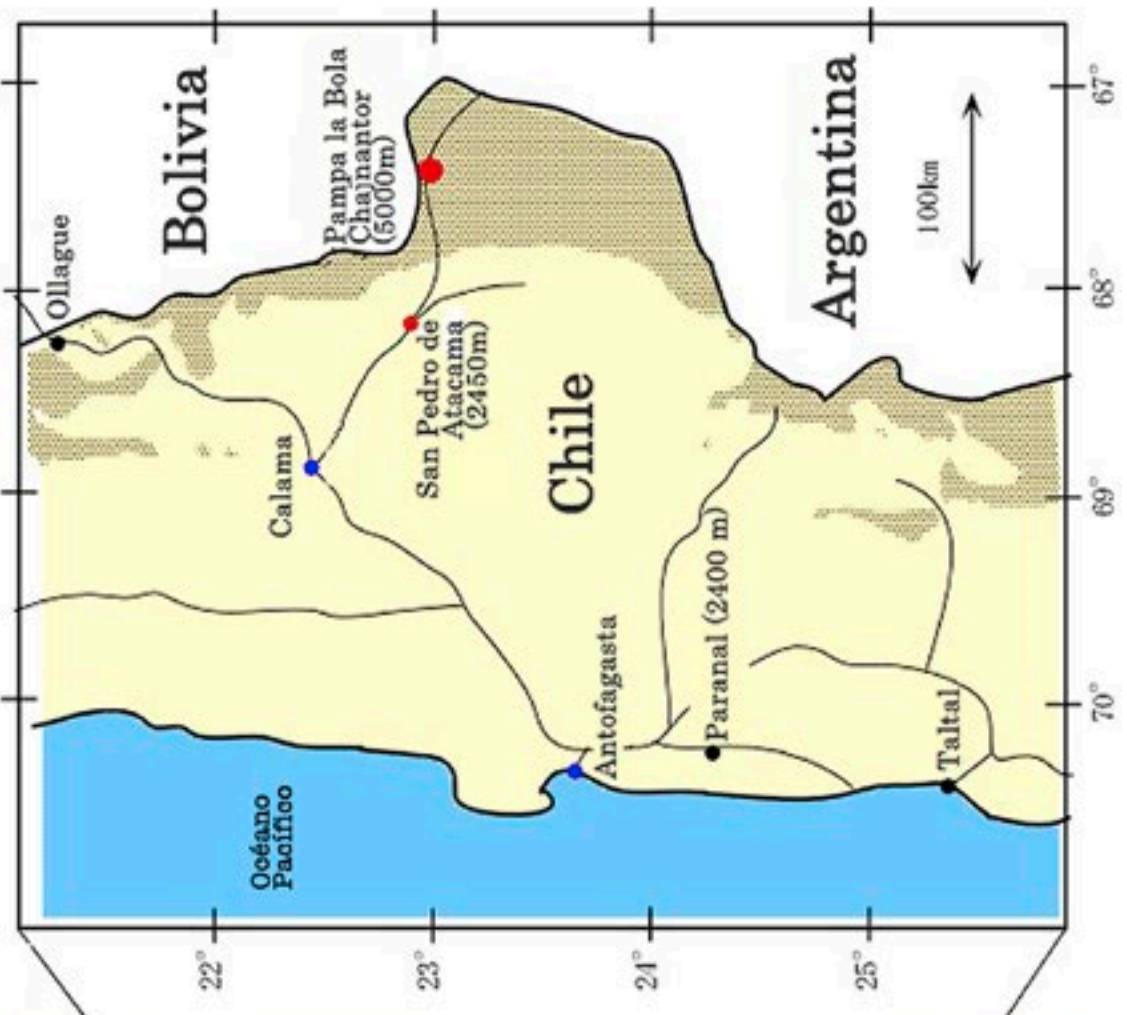


Lámina 15 | Ubicación geográfica

Ubicación de ALMA en el llano de Chajnantor, Región de Antofagasta, Chile.

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)





Observatorio ALMA
5.000 mts. de altitud
Chile



Observatorio Keck
4.145 mts. de altitud
EE.UU.



Very Large Telescope (VLT)
2.635 mts. de altitud
Chile



Observatorio La Silla
2.400 mts. de altitud
Chile



Very Large Array (VLA)
2.124 mts. de altitud
EE.UU.



Observatorio
Nobeyama
1.350 mts. de altitud
Japón

Lámina 16 | Observatorios

Comparación de altitudes donde se ubican diferentes observatorios.

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



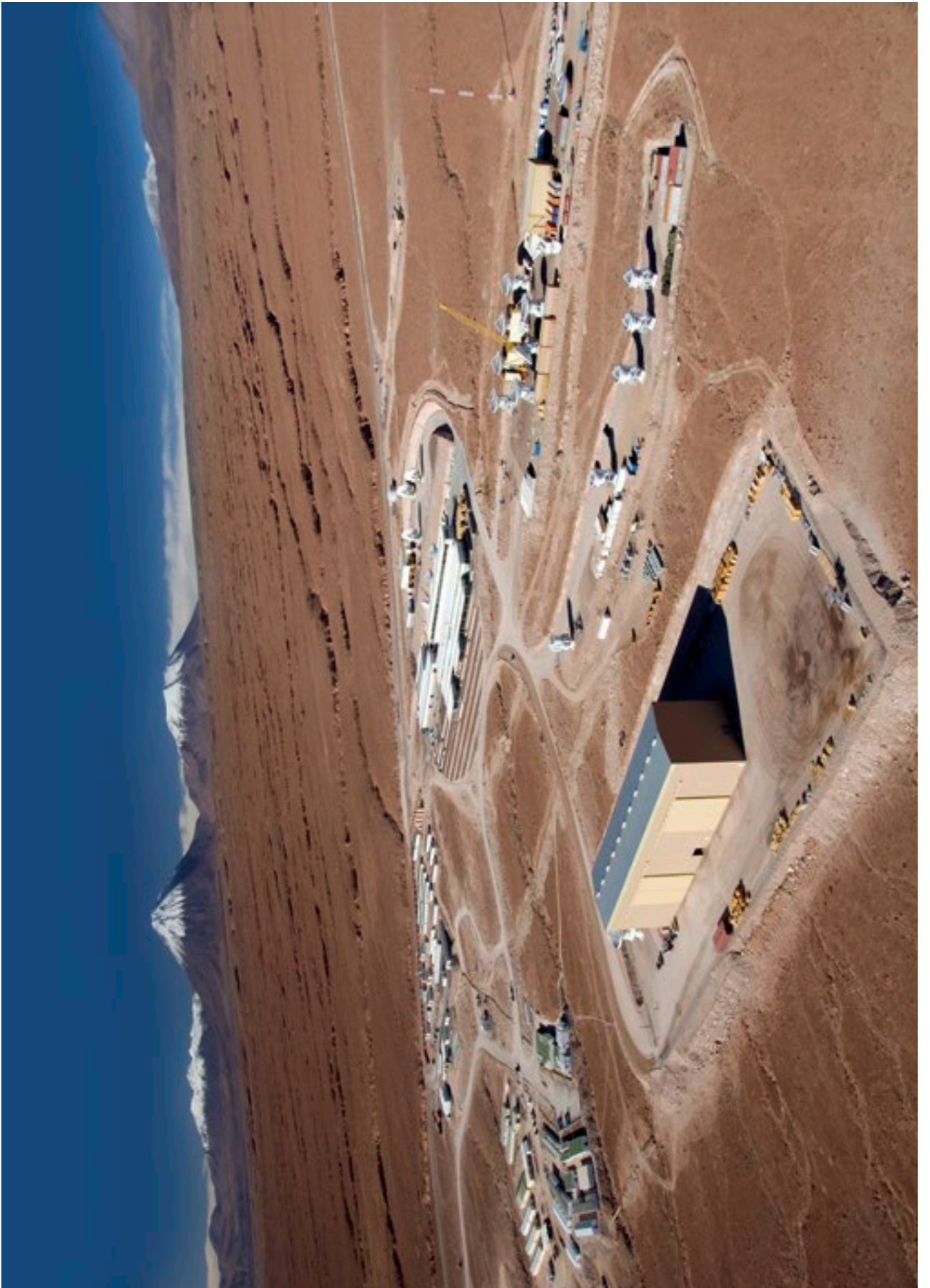


Lámina 17 | OSF

Las instalaciones del Centro de Apoyo a las Operaciones de ALMA (OSF por su sigla en inglés) a una altitud de 2.900 m.

Crédito: ALMA (ESO/ NAOJ/ NRAO), W. Garnier. Agradecimiento: General Dynamics C4 Systems



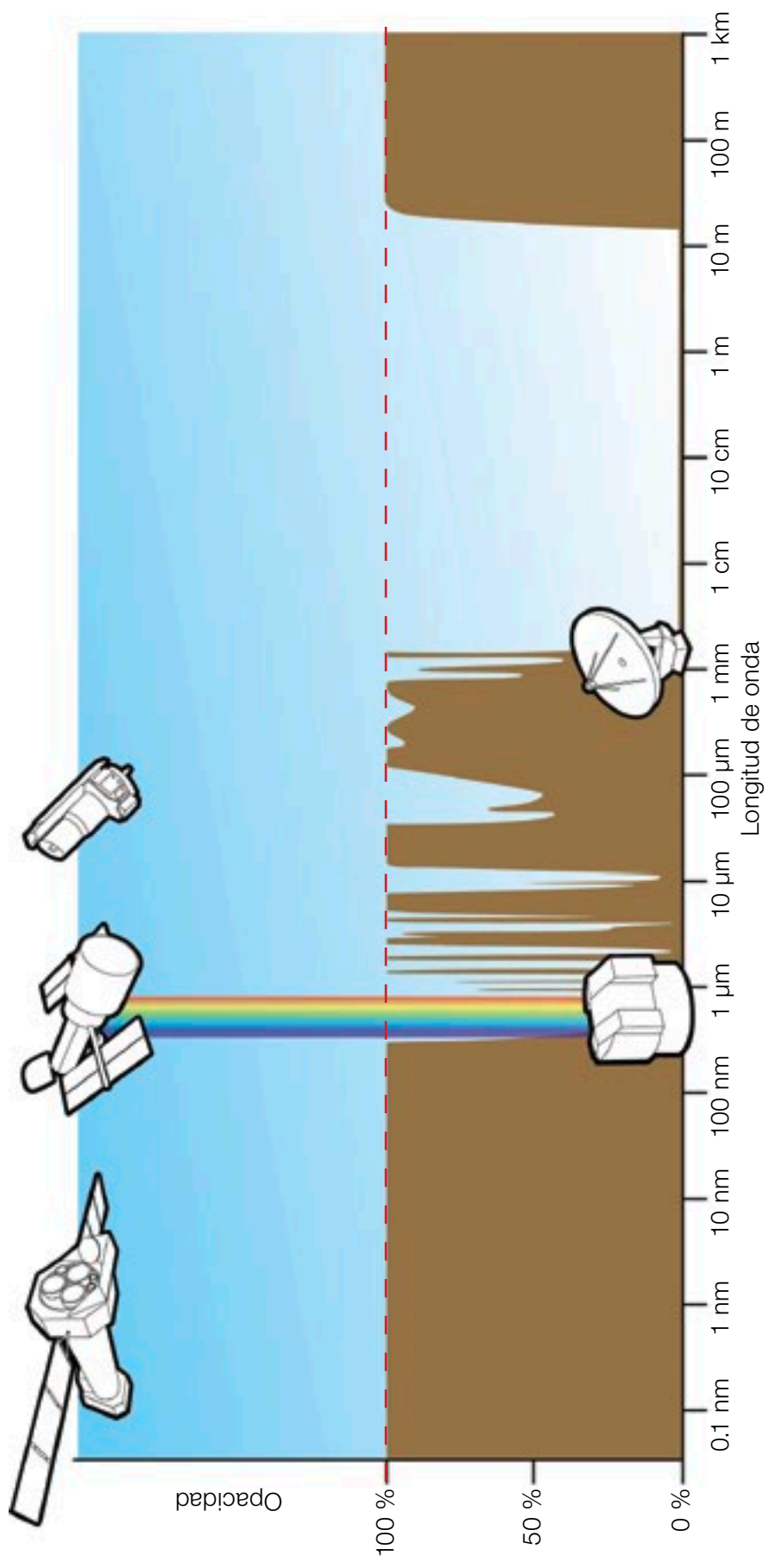
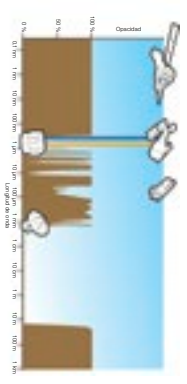


Lámina 18 | Opacidad atmosférica

Gráfico y descripción de la opacidad atmosférica: En este gráfico, el nivel de la curva café representa qué tan opaca es la atmósfera en la longitud de onda dada. Las ventanas más grandes se encuentran en las longitudes de onda visibles (marcadas por un arcoíris) y en las longitudes de onda de radio desde aproximadamente 1 mm hasta 10 m. ALMA opera en una región límite, donde la opacidad depende fuertemente en cuan alto y seco es el sitio.

Crédito: ESA/Hubble (F. Granato)



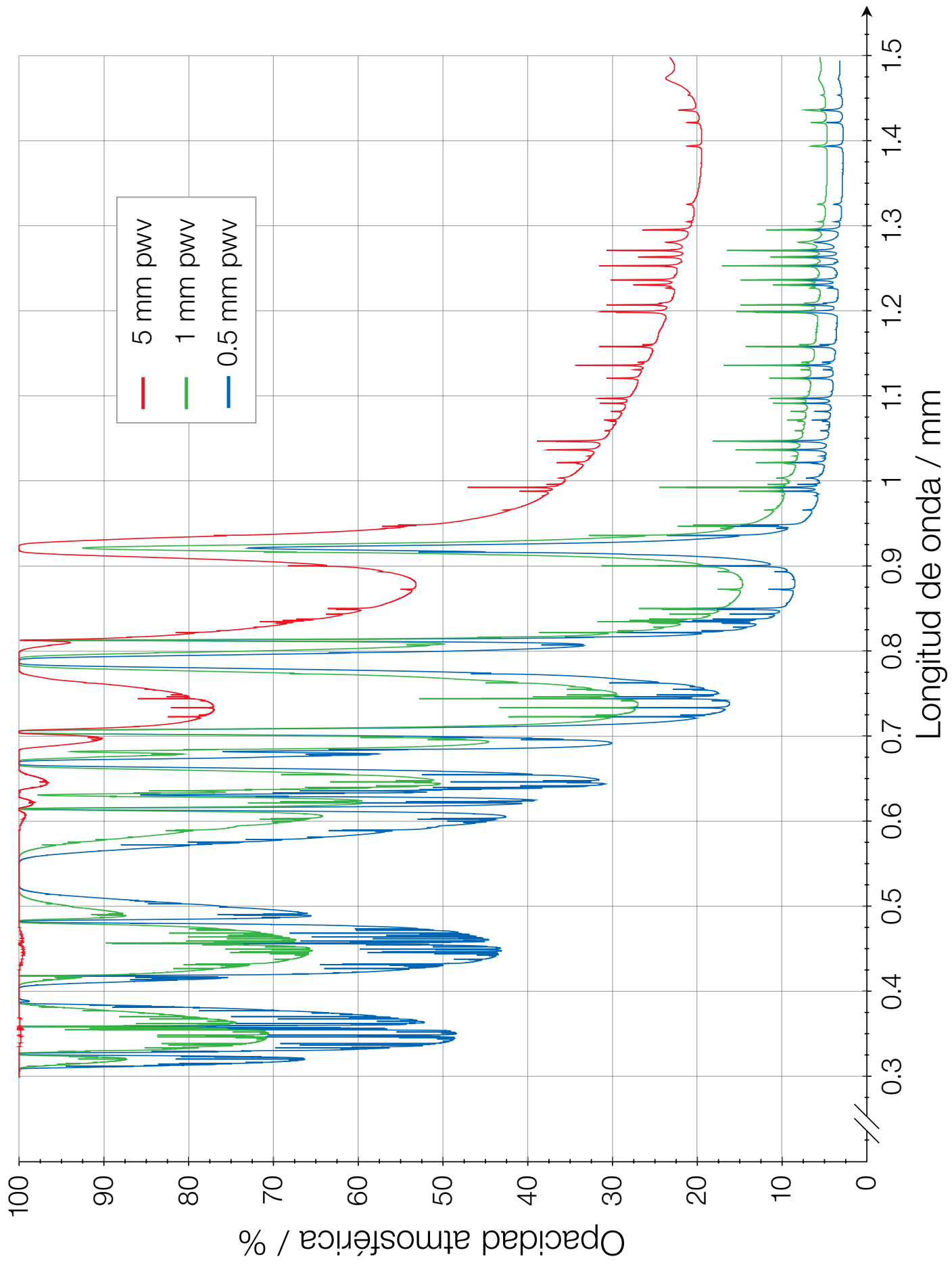
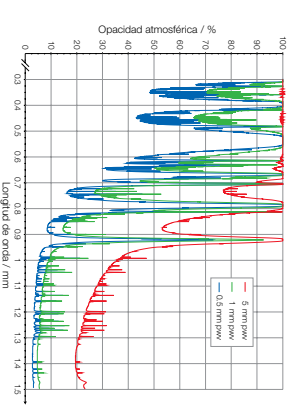


Lámina 19 | Regiones de longitudes

Este gráfico muestra una vista más cercana a la región de longitudes de onda milimétrica y submilimétrica, con las diferentes líneas mostrando cómo la opacidad depende fuertemente de la cantidad de vapor de agua precipitable (pww) en el aire.

Crédito: ESO/APEX



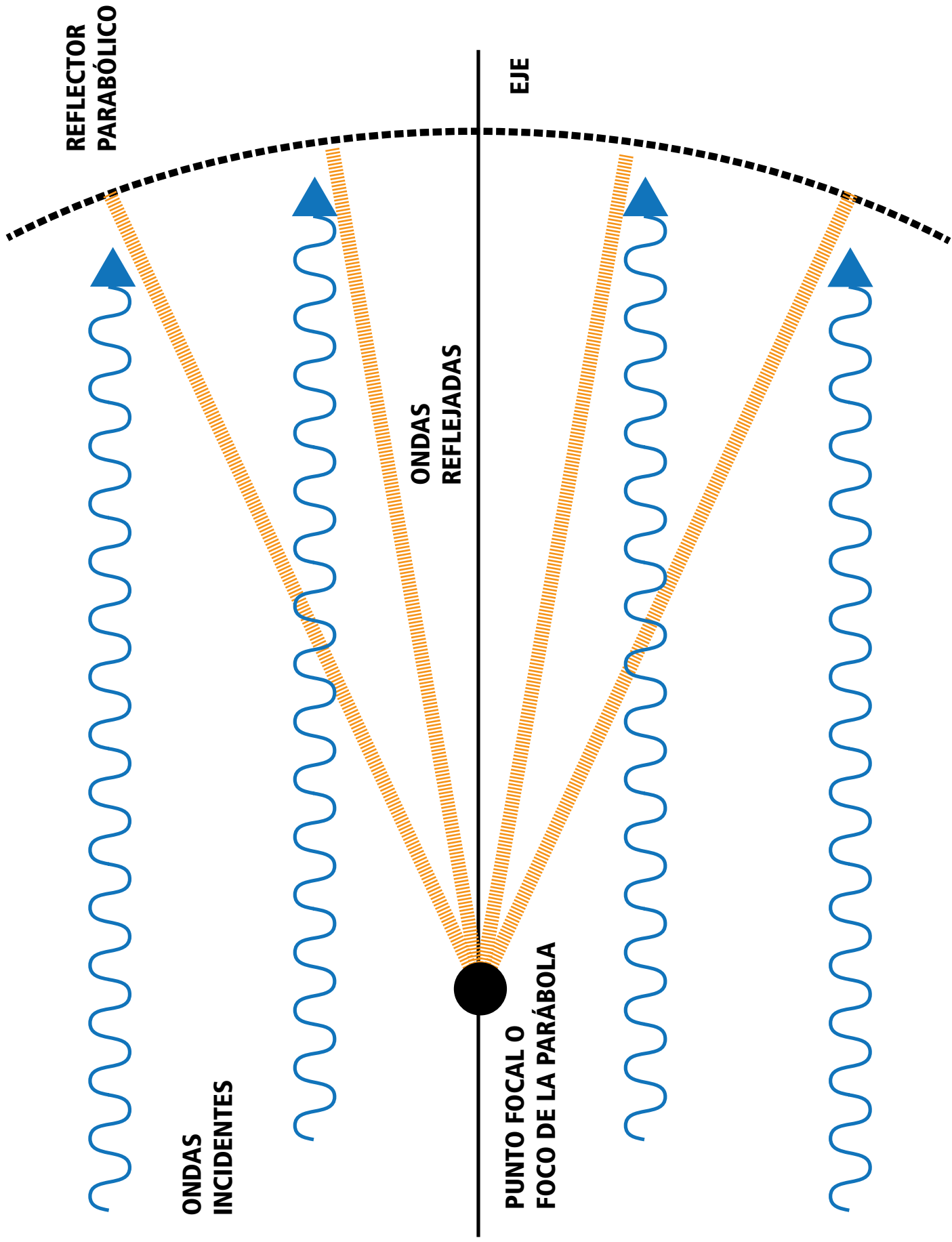
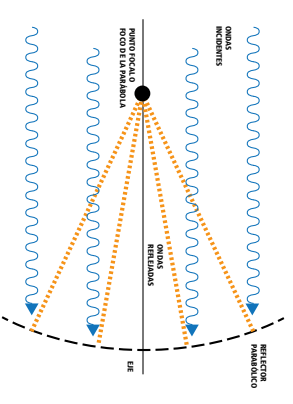


Lámina 20 | Parábola

Imagen que representa un reflector parabólico sobre el que inciden ondas paralelas y que se concentran en el foco.

Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)





Alto y seco , el llano de Chajnantor. Crédito: ESO/Sergio Otarola



Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), una asociación internacional de Europa, Norteamérica y Asia del Este en colaboración con la República de Chile, es el mayor proyecto astronómico que existe. ALMA es un solo telescopio de diseño revolucionario, compuesto de 66 antenas de alta precisión ubicado en el llano de Chajnantor, a 5000 metros de altitud en el norte de Chile.

