

## RADIOASTRONOMÍA: UNA VENTANA AL UNIVERSO

O. E Corzo <sup>a,\*</sup>, M. A Trinidad <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad de Guanajuato, Departamento de Astronomía, Callejón de Jalisco S/N, Col. Valenciana,  
C.P. 36240, Guanajuato, Gto., México. Correo: [oe.corzodominguez@ugto.mx](mailto:oe.corzodominguez@ugto.mx)

### Resumen

En este artículo ofrecemos una visión general de la radioastronomía, una disciplina que detecta ondas electromagnéticas de longitudes de onda mayores a la luz visible para revelar fenómenos cósmicos ocultos, como regiones frías interestelares, nubes moleculares y objetos energéticos como agujeros negros. Describimos la ley de Rayleigh-Jeans para interpretar su emisión en longitudes de onda de radio, así como el uso de radiotelescopios para captar dichas señales. Destacamos descubrimientos clave, como la estructura espiral de la Vía Láctea, la identificación de púlsares y la confirmación del Big Bang mediante el Fondo Cósmico de Microondas. Además, resaltamos la importancia de la radioastronomía en la educación y la divulgación científica, inspirando a nuevas generaciones a explorar el universo.

*Palabras clave:* Astrofísica; Radioastronomía; Radiotelescopios.

## RADIO ASTRONOMY: A WINDOW TO THE UNIVERSE

### Abstract

In this article, we offer an overview of radio astronomy, a discipline that detects electromagnetic waves with wavelengths longer than visible light to reveal hidden cosmic phenomena, such as cold interstellar regions, molecular clouds, and energetic objects like black holes. We describe the Rayleigh-Jeans law to interpret their emission at radio wavelengths, as well as the use of radio telescopes to capture these signals. We highlight key discoveries, such as the spiral structure of the Milky Way, the identification of pulsars, and the confirmation of the Big Bang through the Cosmic Microwave Background. In

addition, we emphasize the importance of radio astronomy in education and scientific outreach, inspiring new generations to explore the universe.

*Keywords:* Astrophysics; Radio Astronomy; Radio Telescopes.

## 1. Introducción

La astronomía ha sido históricamente una ciencia basada en la observación de la luz visible. Desde las primeras observaciones con telescopios ópticos por Galileo Galilei en el siglo XVII, hasta los telescopios espaciales modernos, la luz visible ha constituido la principal herramienta para explorar el universo. Sin embargo, el descubrimiento y posterior desarrollo de la radioastronomía durante el siglo XX abrió una nueva ventana de observación que ha revolucionado nuestro entendimiento del cosmos (Burke y Graham-Smith, 2019).

La radioastronomía permite detectar ondas electromagnéticas con longitudes de onda mucho mayores que las de la luz visible, extendiéndose desde unos pocos milímetros hasta varios metros. Esta capacidad ha permitido estudiar fenómenos que, de otra forma, permanecerían ocultos, como las regiones frías del espacio interestelar, nubes moleculares, y objetos extremadamente energéticos como cuásares, púlsares y agujeros negros activos.

Además, debido a que las ondas de radio atraviesan fácilmente el polvo interestelar (el cual absorbe la luz visible), la radioastronomía ofrece una ventaja crítica al

permitir observar el interior de las galaxias, núcleos galácticos, y otros ambientes altamente enmascarados (Thompson y col., 2017).

Un aspecto fundamental de la radioastronomía es entender la emisión de ondas de radio como resultado de procesos físicos que ocurren en el espacio. A bajas frecuencias, la energía asociada a la radiación es muy pequeña en comparación con la energía térmica del entorno. En este caso, se puede usar una ecuación simplificada conocida como la **ley de Rayleigh-Jeans** para describir cuánta energía emite una fuente en forma de ondas de radio. La ley de Rayleigh-Jeans se expresa matemáticamente como:

$$I(\nu) = \frac{2kT\nu^2}{c^2} \quad (1)$$

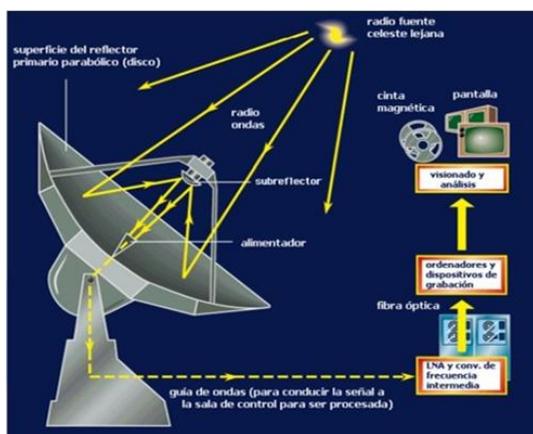
donde  $I(\nu)$  es la intensidad de la radiación en función de la frecuencia  $\nu$ ,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $c$  es la velocidad de la luz, y  $T$  es la temperatura del emisor.

Esta ecuación (1) se puede aplicar cuando la radiación transporta muy poca energía, como ocurre en el caso de las ondas de radio, donde esa energía es mucho menor que la energía térmica del entorno. En la radioastronomía, esta aproximación resulta extremadamente útil para interpretar las emisiones térmicas de

regiones como las nubes de hidrógeno interestelar o los discos protoplanetarios.

Para captar estas ondas de radio, se utilizan instrumentos especializados llamados radiotelescopios. Un radiotelescopio consta de varios componentes esenciales, que trabajan en conjunto para recolectar, amplificar y analizar las débiles señales procedentes del espacio.

En la Figura 1 se muestra un diagrama que ilustra el funcionamiento de un radiotelescopio de manera general. Las ondas de radio procedentes de una fuente inciden sobre la superficie parabólica del reflector primario.



**Figura 1.** Diagrama esquemático del funcionamiento de un radiotelescopio (Vega, 2022).

Este esquema de procesamiento permite detectar señales increíblemente débiles, del orden de fracciones de kelvin en temperatura de brillo (ver sección 3.1), haciendo posible

el estudio de fenómenos cosmológicos primordiales y las propiedades físicas de objetos lejanos.

El desarrollo de técnicas como la interferometría, donde múltiples radiotelescopios se combinan para simular un único telescopio de apertura mayor, ha llevado la radioastronomía a alcanzar resoluciones angulares capaces de observar detalles a escalas de fracciones de milisegundo de arco, abriendo un nuevo horizonte para la investigación astronómica (Thompson y col., 2017).

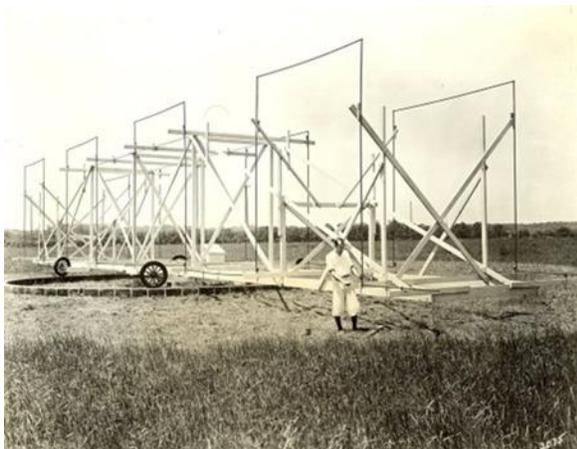
## 2. Historia y Evolución de la Radioastronomía

### 2.1. Orígenes y Descubrimientos Iniciales

El nacimiento de la radioastronomía se remonta a la década de 1930, cuando Karl Jansky, ingeniero en laboratorios Bell, detectó por primera vez señales de radio provenientes del espacio. Su descubrimiento fue accidental, mientras investigaba las fuentes de interferencia en las comunicaciones transatlánticas, encontró una señal que se repetía cada 23 horas y 56 minutos, coincidiendo con el periodo de

rotación sideral de la Tierra. Este hallazgo reveló que no solo las fuentes terrestres emitían en radio, sino que también el centro de la Vía Láctea generaba una potente radiación en estas frecuencias Sullivan (2009).

En la Figura 2 se muestra Jansky junto a su antena rotatoria que empleó para sus descubrimientos, conocida como “la rueda de vagón de Jansky”. Esta antena era capaz de rotar 360° en el plano horizontal, lo que permitía identificar la dirección de las fuentes de radio.



**Figura 2.** Karl Jansky con su antena rotatoria, con la que detectó las primeras señales de radio de origen celeste (Morven Museum & Garden, s.f.).

Poco tiempo después, Grote Reber, un radioaficionado e ingeniero en radio inspirado por el trabajo de Jansky, construyó

en 1937 el primer radiotelescopio parabólico en el patio de su casa. Gracias a este instrumento, Reber produjo el primer mapa del cielo en frecuencias de radio, revelando la estructura extendida de la Vía Láctea y demostrando que las emisiones no provenían exclusivamente de fuentes puntuales.

En la Figura 3 se observa a Reber junto a su radiotelescopio, marcando así un hito en la exploración sistemática del firmamento en ondas de radio.



**Figura 3.** Grote Reber junto a su primer radiotelescopio parabólico. (Ancient Pages, 2016)

Estos descubrimientos sentaron la base de las nuevas disciplinas astronómicas y abrieron el camino para la identificación de múltiples fuentes astrofísicas, incluyendo remanentes de supernovas, galaxias activas y nebulosas. Asimismo, mostraron que las observaciones en radio aportan información esencial sobre procesos físicos no accesibles a través de la luz visible.

## 2.2. Desarrollo Tecnológico

Durante la segunda mitad del siglo XX, la radioastronomía experimentó un notable impulso gracias a la construcción de radiotelescopios de gran tamaño y al desarrollo de técnicas como la interferometría, que permiten combinar señales de varias antenas para mejorar la resolución de las imágenes. Un ejemplo destacado es el Very Large Array (VLA), mostrado en la Figura 4, que utiliza esta técnica mediante 27 antenas de 25 metros cada una y distribuidas en forma de Y.

Más detalles sobre esta técnica se abordan en la sección 3.2.



**Figura 4.** Vista aérea del Very Large Array (VLA) en Nuevo México (National Radio Astronomy Observatory, 2025).

Otro instrumento de vanguardia es el *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA), ubicado en el llano de

Chajnantor en Chile, que opera en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas para estudiar regiones frías del universo, como las zonas de formación estelar (Wootten y Thompson, 2009).

La radioastronomía ha permitido la detección y estudio de fenómenos exóticos, como los púlsares, descubiertos en 1967 por Jocelyn Bell Burnell y Antony Hewish, y la radiación de fondo de microondas (CMB), detectada por Arno Penzias y Robert Wilson en 1965 (Penzias y Wilson, 1965). Estas observaciones han contribuido de forma fundamental al desarrollo de la comprensión de la estructura y evolución de las galaxias.

Además, el estudio de fuentes de radio intensas permite explorar la naturaleza de agujeros negros supermasivos en núcleos de galaxias activas, mejorar así la medición de distancias astronómicas mediante técnicas como VLBI (Very Long Baseline Interferometry) y mejorar la medición de parámetros cosmológicos clave.

En definitiva, la radioastronomía se ha consolidado como una herramienta indispensable para la astronomía moderna, complementando las observaciones en todos los rangos de frecuencia conocidos.

### 3. Generalidades de los radiotelescopios

#### 3.1. Espectro Electromagnético

Las ondas de radio constituyen un tipo de radiación electromagnética caracterizada por longitudes de onda que abarcan desde unos pocos milímetros hasta varios kilómetros, o en términos de frecuencia, cubriendo frecuencias aproximadas entre los 3 kHz y 300 GHz. Dentro de este amplio rango, la radioastronomía se concentra en aquellas frecuencias que pueden ser detectadas desde la superficie terrestre, conocidas como las “ventanas de radio”.

Estas llamadas ventanas de radio corresponden a rangos del espectro electromagnético en los que la atmósfera terrestre deja pasar las ondas de radio casi sin bloquearlas. En astronomía observacional, a esto se le conoce como transparencia atmosférica, y ocurre porque ciertos gases, como el vapor de agua y el oxígeno molecular, apenas absorben radiación en esas frecuencias (Burke y Graham-Smith, 2019).

Gracias a esta transparencia, es posible realizar observaciones astronómicas desde la superficie terrestre, sin necesidad de satélites o sondas espaciales. Además, a diferencia de la luz visible, las ondas de radio pueden atravesar grandes cantidades de polvo y gas

interestelar con mínima atenuación, lo que permite estudiar regiones del universo que de otro modo permanecerían ocultas.

En la Figura 5 se ilustra el espectro electromagnético completo, destacando la posición relativa de las ondas de radio respecto a otras bandas como el infrarrojo, el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.



Figura 5. Representación gráfica del espectro electromagnético (CIENTEC, 2023).

Cuando los radiotelescopios reciben señales del espacio, lo que realmente miden es cuánta energía llega desde una fuente en el cielo. Para describir esa cantidad, en radioastronomía se utilizan dos magnitudes fundamentales.

La primera es la densidad de flujo, que indica cuánta energía llega por segundo, por metro cuadrado y por unidad de frecuencia. Se expresa en unidades llamadas Janskys (**Jy**), donde:

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \quad (3)$$

Este valor permite comparar la “intensidad” de distintas fuentes astronómicas. Cuanto mayor es el número de Janskys, más potente es la señal que llega a la Tierra.

La segunda es la temperatura de brillo ( $T_b$ ), que relaciona la intensidad de la señal observada con la temperatura que tendría un cuerpo negro para emitir esa misma cantidad de radiación. Esta medida resulta especialmente útil cuando se estudian regiones extensas del cielo, como nubes de gas, en las que no se puede hablar de una fuente puntual.

### 3.2. Radiotelescopios y Antenas

Los radiotelescopios constituyen la pieza central de la radioastronomía, diseñados para captar señales débiles provenientes del cosmos. Su diseño depende de la frecuencia de observación y de los objetivos científicos específicos.

Entre los tipos más comunes de radiotelescopios se encuentran:

- **Antenas parabólicas individuales:** Estas antenas utilizan un reflector parabólico que concentra la radiación en un receptor ubicado en el foco. Son ideales para realizar cartografías extensas del cielo, detectar líneas de emisión

específicas como la línea de 21 cm del hidrógeno neutro, y para observaciones de objetos extendidos. Un ejemplo de este tipo de antena se muestra en la Figura 6, donde se observa la típica estructura parabólica empleada en radioastronomía.



**Figura 6.** Radiotelescopio de Effelsberg en Alemania (MPIFR, 2025)

- **Arreglos interferométricos:** En lugar de utilizar una sola antena, estos sistemas combinan la señal captada por múltiples antenas distribuidas sobre una extensa área. Esta técnica, conocida como interferometría, permite obtener imágenes con una resolución angular superior a la de un solo telescopio. La Figura 7 muestra el arreglo interferométrico conocido como ALMA, donde se combinan señales de varias antenas para sintetizar una apertura mayor.



**Figura 7.** Imagen aérea del interferómetro ALMA (ALMA OBSERVATORY, 2021)

- **Matrices de dipolos o antenas simples:** Utilizadas principalmente para observaciones a bajas frecuencias (por debajo de 300 MHz), estas matrices consisten en grandes cantidades de antenas simples, como dipolos, organizadas sobre extensas áreas. En la Figura 8 se ilustra una matriz de dipolos, como las empleadas en observatorios modernos de baja frecuencia, tales como LOFAR.



**Figura 8.** Matriz de antenas de baja frecuencia de LOFAR (ASTRON SCIENCE, 2025)

## 4. Mecanismos de Emisión

En los objetos astronómicos, la radiación electromagnética detectada se origina a partir de diversos procesos físicos, los cuales se clasifican, de manera general, en dos categorías principales: térmicos y no térmicos. Enfocándonos en el dominio de radiofrecuencias, estos mecanismos proporcionan información distinta sobre las condiciones físicas de fuentes astronómicas y del medio interestelar (Wilson y col., 2013).

### 4.1 Emisión Térmica

La emisión térmica está asociada a fuentes en equilibrio termodinámico, donde las partículas intercambian constantemente energía mediante colisiones y radiación. Esta categoría se divide principalmente en dos tipos: emisión de continuo y emisión de líneas espectrales.

#### 4.1.1. Emisión de Continuo

- **Emisión de cuerpo negro:** Corresponde a la radiación emitida por un “objeto ideal” que no refleja nada y absorbe toda la energía que le llega. Este tipo de objeto emite energía de manera muy específica, dependiendo solo de su temperatura: a mayor temperatura, mayor cantidad de

radiación y a frecuencias más altas. A bajas frecuencias, esta emisión sigue un comportamiento más simple, descrito por la ley de Rayleigh-Jeans (véase ecuación 1), donde la intensidad crece proporcionalmente al cuadrado de la frecuencia. Ejemplos de fuentes con este tipo de emisión en radio incluyen el CMB y las regiones densas de polvo interestelar.

- **Emisión libre-libre o Bremsstrahlung:** Esta emisión se origina cuando electrones libres son acelerados en los campos eléctricos de iones positivos, sin ser capturados. El proceso da lugar a un espectro continuo que depende de la temperatura y densidad del gas caliente. Es particularmente relevante en regiones HII ionizadas por estrellas jóvenes y en el medio intergaláctico caliente (Condon y Ransom, 2016).

#### 4.1.2. *Emisión de Líneas Espectrales*

Este tipo de emisión ocurre cuando los átomos o moléculas en un gas pasan de un nivel de energía a otro. Esa diferencia de energía se libera (o se absorbe) en forma de radiación, pero no de manera continua, sino en frecuencias muy precisas. Estas

frecuencias producen picos en el espectro, llamados líneas espectrales.

Cuando un átomo o molécula emite energía al pasar de un nivel alto a uno más bajo, se forma una línea de emisión. En cambio, si absorbe energía y pasa de un nivel bajo a uno más alto, se forma una línea de absorción. Este fenómeno depende del tipo de partícula (por ejemplo, átomos como el hidrógeno o moléculas como el agua o el metanol), así como de las condiciones físicas del entorno, como la temperatura y la densidad. Cada línea corresponde a una transición particular entre niveles de energía. En los átomos, estas transiciones suelen ser electrónicas, mientras que en las moléculas también pueden involucrar cambios rotacionales o vibracionales.

- **Transiciones atómicas:** Un ejemplo icónico es la línea de 21 cm del hidrógeno neutro (HI), utilizada para cartografiar la distribución del gas neutro en galaxias y estudiar su dinámica a gran escala (Draine, 2011). La explicación física de esta transición se presenta en la sección 5.1.
- **Transiciones moleculares:** Incluyen líneas asociadas a moléculas como OH, H<sub>2</sub>O, HCN y CH<sub>3</sub>OH, entre muchas otras.

Estas moléculas pueden realizar distintos tipos de transiciones:

- **Rotacionales**, ocurren cuando la molécula gira, se detectan principalmente en ondas de radio o milimétricas, ya que su energía es muy baja.
- **Vibracionales**, implican oscilaciones internas entre los átomos que componen la molécula, se detectan en el infrarrojo, ya que requieren más energía.

Este tipo de señales (rotacionales y vibracionales) permite conocer la temperatura, densidad y composición química de nubes moleculares y regiones donde se están formando nuevas estrellas (Hulse y Taylor, 1975).

#### 4.2. Emisión No Térmica

En contraste con los mecanismos térmicos, los procesos no térmicos son independientes de la temperatura del medio, estos son interacciones de partículas cargadas, campos magnéticos o fenómenos de emisión coherente. Estas emisiones son típicas de ambientes altamente energéticos y violentos en el Universo.

Un ejemplo de esta emisión es la radiación sincrotrón, la cual se produce cuando

electrones relativistas giran en torno a las líneas del campo magnético, emitiendo radiación continua que se extiende desde la radio hasta frecuencias más altas. El espectro de muchas fuentes de emisión no térmica, como la radiación sincrotrón, sigue una ley de potencias del tipo  $S_\nu \propto \nu^\alpha$ , donde  $S_\nu$  es la cantidad de energía que llega en función de la frecuencia  $\nu$ , y  $\alpha$  es un número llamado índice espectral. Aunque esta forma matemática también aparece en procesos térmicos, por ejemplo, el cuerpo negro con  $\alpha = +2$  en el régimen de Rayleigh-Jeans, o la emisión libre-libre con  $\alpha \approx -0.1$ , los valores típicos de  $\alpha$  ayudan a distinguir entre procesos. En la radiación sincrotrón, por ejemplo, el índice espectral suele ser negativo (entre  $-0.5$  y  $-0.7$ ), lo que refleja su origen en electrones muy energéticos moviéndose en campos magnéticos intensos. Este mecanismo es característico de remanentes de supernovas, núcleos galácticos activos (AGN), lóbulos de radio y chorros relativistas (Longair, 2011). Además, la radiación sincrotrón suele estar altamente polarizada, proporcionando información clave sobre la estructura de los campos magnéticos.

Un caso especial de emisión no térmica es el máser astronómico, este término, derivado

de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es un fenómeno en el que ciertas moléculas emiten ondas de radio de forma amplificada y coherente, de manera parecida a un láser, pero en frecuencias más bajas. Esto ocurre cuando hay una inversión de población: más moléculas están en un estado energético alto que en uno bajo, lo que permite que una pequeña señal desencadene muchas más emisiones iguales. Este proceso produce señales muy intensas, que se han detectado en regiones de formación estelar, envoltantes de estrellas evolucionadas y en centros galácticos. Astrofísicamente, máseres de OH, H<sub>2</sub>O, SiO y CH<sub>3</sub>OH son detectados en regiones de formación estelar, envoltantes de estrellas evolucionadas y centros galácticos, actuando como trazadores de densidad, cinemática y condiciones físicas del medio (Gray, 2012). La caracterización y distinción entre estos mecanismos de emisión (térmicos y no térmicos) permite inferir parámetros fundamentales del medio interestelar, como la profundidad óptica, la densidad columnar, condiciones termodinámicas, la distribución de partículas y, en algunos casos, la configuración de campos magnéticos. Además, las observaciones de radio aportan una visión única sobre la

evolución dinámica y química de los objetos astronómicos.

## **5. Aplicaciones y Descubrimientos Relevantes**

A lo largo de su historia, la radioastronomía ha permitido avances clave en la comprensión del universo, aportando observaciones únicas que han transformado nuestra visión de la astrofísica moderna. Ha sido esencial para descubrir fenómenos revolucionarios en la estructura galáctica, la física de objetos compactos, la cosmología y los procesos de formación estelar y galáctica.

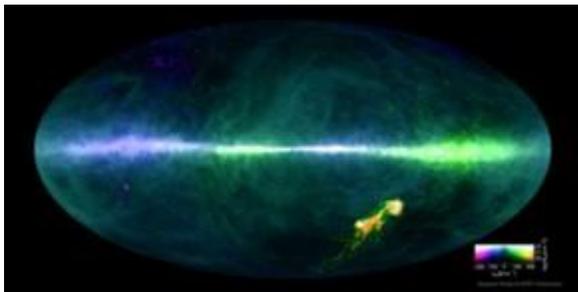
Muchos de estos logros han sido reconocidos con premios internacionales, incluidos varios Premios Nobel de Física (Condon y Ransom, 2016).

### *5.1. Estudio de la Estructura Galáctica*

La observación de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro (HI) ha sido clave para mapear la forma espiral de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Esta señal se origina cuando el electrón en el átomo de hidrógeno cambia su orientación en relación con el núcleo. Aunque este cambio ocurre muy raramente, el hidrógeno es tan abundante en el universo que la señal se puede detectar con claridad (Draine, 2011).

Una de las grandes ventajas de esta línea es que atraviesa fácilmente el polvo interestelar, lo que permite estudiar el gas distribuido en la galaxia, incluso en zonas que la luz visible no puede alcanzar.

A través del análisis del corrimiento Doppler de la línea de 21 cm, se han podido inferir las velocidades radiales del gas, reconstruir el patrón espiral del disco galáctico y estudiar su cinemática. Esta información ha proporcionado una de las primeras evidencias observacionales de la existencia de materia oscura en galaxias, al observar curvas de rotación planas a grandes radios (Sofue y Rubin, 2001).



**Figura 9.** Mapa de la Vía Láctea en la línea de 21 cm del hidrógeno neutro, revelando la estructura espiral del disco galáctico (ICRAR, 2016).

### 5.2. Púlsares y Estrellas de Neutrones

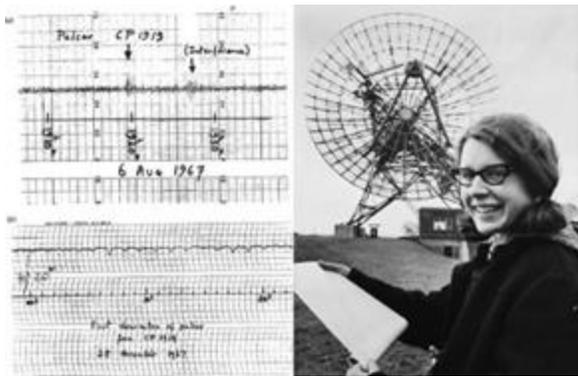
En 1967, Jocelyn Bell Burnell y Antony Hewish detectaron señales periódicas de radio que no podían explicarse por fuentes

astronómicas conocidas. Posteriormente, se identificaron como emisión de estrellas de neutrones rotantes altamente magnetizadas, conocidas como púlsares.

Los púlsares, debido a su extrema regularidad, actúan como relojes cósmicos naturales. Su estudio ha permitido:

- Confirmar predicciones de la relatividad general, como la emisión de ondas gravitacionales en sistemas binarios, evidenciada en PSR B1913+16, un sistema de dos estrellas de neutrones en órbita mutua (Hulse y Taylor, 1975).
- Investigar el estado de la materia ultradensa en el interior de estrellas de neutrones.
- Desarrollar redes de púlsares para la búsqueda de ondas gravitacionales de baja frecuencia (proyectos como NANOGrav y IPTA).

Este descubrimiento fue reconocido con el Premio Nobel de Física en 1974 otorgado a Antony Hewish.



**Figura 10.** Registro original de la primera detección de un púlsar por Jocelyn Bell Burnell en 1967 (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2023).

### 5.3. *Agujeros Negros y Núcleos Activos de Galaxias*

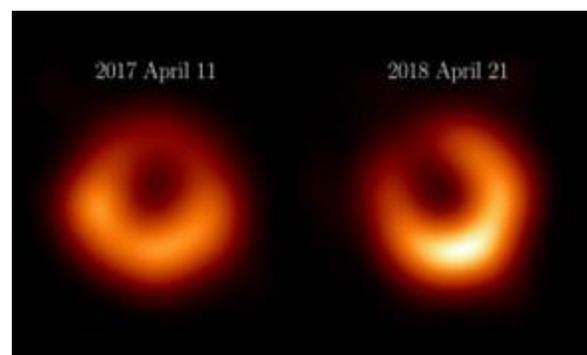
La radioastronomía ha sido fundamental para el estudio de los AGN, donde residen agujeros negros supermasivos. Observaciones en radio de chorros relativistas han permitido caracterizar la estructura de los discos de acreción y la intensidad de los campos magnéticos próximos al horizonte de eventos.

Una técnica clave en radioastronomía para obtener imágenes de altísima resolución es la interferometría VLBI. Consiste en combinar de forma coherente las señales captadas por varios radiotelescopios separados por cientos o miles de kilómetros, a veces hasta distribuidos por todo el planeta. Esto permite simular un telescopio del tamaño equivalente

a la mayor distancia entre las antenas, conocida como línea de base.

Gracias a esta técnica, es posible estudiar con gran detalle regiones muy compactas del universo, como los alrededores de agujeros negros. Un ejemplo destacado es la observación del agujero negro en la galaxia M87, obtenida mediante la red global del Telescopio del Horizonte de Eventos (EHT).

La Figura 11 muestra la primera imagen de la sombra de un agujero negro obtenida por el proyecto EHT en 2017 y 2018 (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). Este logro fue galardonado con el **Breakthrough Prize** en Física Fundamental en 2020.



**Figura 11.** Primera imagen de un agujero negro en M87 obtenida por el EHT (SINC, 2024).

#### 5.4. Cosmología y Fondo Cósmico de Microondas

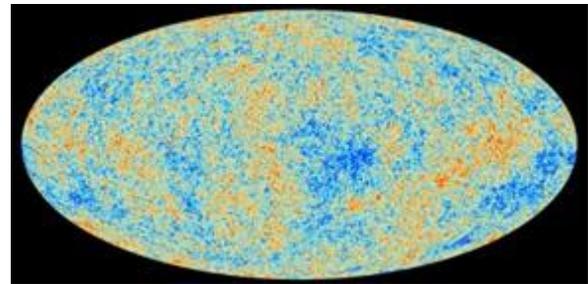
El CMB es una radiación muy tenue que llena todo el universo y proviene del momento en que el cosmos se volvió transparente, aproximadamente 380,000 años después del Big Bang. A partir de entonces, la luz pudo viajar libremente por el espacio, dejando un registro térmico del universo temprano.

Aunque esta radiación es casi uniforme en todas direcciones, presenta pequeñas variaciones de temperatura conocidas como anisotropías. Estas diferencias reflejan irregularidades en la densidad del universo primitivo y corresponden a las semillas de las estructuras cósmicas que observamos hoy, como galaxias y cúmulos de galaxias.

El estudio detallado del CMB y de sus anisotropías, realizado por misiones como COBE, WMAP y Planck, ha permitido:

- Determinar la edad, el contenido de materia y energía, y la geometría global del universo (Planck Collaboration, 2020).
- Contrastar modelos cosmológicos que incluyen inflación, materia y energía oscuras.
- Investigar el origen de las grandes estructuras del universo.

La Figura 12 muestra el mapa de anisotropías del CMB obtenido por la misión Planck.



**Figura 12.** Mapa del Fondo Cósmico de Microondas obtenido por la misión Planck, mostrando las anisotropías primordiales (IAC, 2018)

#### 5.5. Estudio del Medio Interestelar

La radioastronomía permite penetrar las regiones más densas y opacas del medio interestelar (ISM). A través de la detección de líneas de emisión de átomos neutros, iones y moléculas, se han podido estudiar las distintas fases del ISM:

- Gas difuso neutro (HI), observable en 21 cm.
- Gas molecular (trazado por el CO y otras moléculas).
- Gas ionizado caliente (trazado mediante emisión libre-libre y líneas de recombinación).

Estos estudios son esenciales para entender la formación estelar, la evolución galáctica, la retroalimentación estelar y la química del medio interestelar (Draine, 2011).

La formación de estrellas ocurre en el interior de nubes moleculares frías y densas, que son casi invisibles en luz óptica, pero brillantes en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas.

La interferometría moderna permite (Penzias y Wilson, 1965):

- Mapear discos protoplanetarios y observar el proceso de acreción estelar.
- Detectar flujos bipolares y chorros asociados al nacimiento estelar.
- Estudiar la fragmentación jerárquica de nubes moleculares y el origen de cúmulos estelares.

La combinación de observaciones en radio continuo y en líneas espectrales ha revolucionado la comprensión del proceso de formación estelar, desde el colapso gravitacional inicial hasta la formación de sistemas planetarios.

En conclusión, la radioastronomía continúa siendo una de las herramientas más poderosas para explorar el universo, extendiendo nuestro conocimiento desde la física fundamental hasta los procesos más extremos de formación y evolución cósmica.

## 6. Implicaciones en la Educación y la Divulgación Científica

La radioastronomía no solo impulsa avances en la investigación de frontera, sino que también desempeña un papel fundamental en la educación formal, la formación técnica, y la apropiación social del conocimiento. A través de sus aplicaciones multidisciplinarias y del acceso creciente a tecnologías de bajo costo, se ha consolidado como una herramienta poderosa para inspirar vocaciones científicas, reducir brechas educativas y fortalecer la cultura científica en la sociedad (International Astronomical Union, 2020).

### 6.1. Educación Formal e Institucional

La radioastronomía no solo impulsa la investigación científica, sino que también cumple un papel clave en la educación formal, la formación técnica y la apropiación social del conocimiento. Gracias a sus aplicaciones multidisciplinarias y al acceso creciente a tecnologías de bajo costo, se ha consolidado como una herramienta poderosa para promover vocaciones tempranas en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas; reducir brechas de género mediante la participación activa de niñas y mujeres

jóvenes en actividades científicas; y fomentar la equidad educativa al acercar experiencias científicas de calidad a comunidades tradicionalmente marginadas. Además, fortalece la cultura científica en la sociedad y estimula habilidades como el pensamiento crítico, la innovación tecnológica y el trabajo colaborativo (International Astronomical Union, 2020).

Entre las contribuciones más relevantes se encuentran:

- Capacitación de estudiantes en técnicas de observación en radiofrecuencias, incluyendo el uso de radiotelescopios operacionales y simulados.
- Realización de prácticas de laboratorio en las que se aplican conceptos de electromagnetismo, espectroscopia y análisis de señales.

Instituciones de renombre como el National Radio Astronomy Observatory (NRAO) en Estados Unidos, el Jodrell Bank Centre for Astrophysics en Reino Unido, y el Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) en Europa han desarrollado programas académicos, talleres y pasantías específicas para estudiantes de todo el mundo (NRAO, 2023). Estas experiencias formativas no solo proporcionan conocimientos técnicos, sino que también fomentan habilidades

transversales como el trabajo colaborativo, el pensamiento crítico y la innovación tecnológica

## 6.2. *Instituciones Públicas y Redes de Colaboración*

En el contexto mexicano, iniciativas como la Red Mexicana de Radiotelescopios han emergido como motores para el fortalecimiento de la radioastronomía educativa y de investigación. Esta red, integrada por universidades y centros de investigación, tiene como objetivos principales:

- Facilitar la construcción, instalación y operación de radiotelescopios de bajo costo en instituciones educativas.
- Promover la colaboración interdisciplinaria en áreas de instrumentación, software de adquisición de datos y procesamiento de señales.
- Estimular la formación temprana de estudiantes en proyectos de observación y análisis reales, orientados a la investigación de fenómenos astrofísicos.

Proyectos como “Una antena en tu escuela”, “Mini Radio Telescopios (MRT)” y actividades lideradas por instituciones como el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y el Instituto de

Radioastronomía y Astrofísica (IRyA-UNAM) han demostrado que es posible integrar la radioastronomía en distintos niveles educativos (INAOE, 2022).

Estas redes de colaboración fortalecen la infraestructura educativa, promueven la transferencia de conocimiento y potencian la formación de futuras generaciones de científicos e ingenieros.

Por otro lado, la adopción de plataformas digitales ha expandido notablemente el alcance de la divulgación. Iniciativas como canales de YouTube especializados, como “IAR Radioastronomía”, redes de divulgación como “Astronomía al Aire”, y cuentas en redes sociales permiten democratizar el acceso al conocimiento astronómico.

Estas actividades contribuyen a crear una cultura científica más sólida, a estimular el pensamiento crítico en la ciudadanía y a posicionar a la radioastronomía como un elemento de inspiración social.

## **7. Conclusiones**

En este artículo, exploramos la radioastronomía como una herramienta clave para comprender el Universo, permitiendo revelar fenómenos cósmicos

que de otro modo permanecerían ocultos. Desde los esfuerzos iniciales de figuras como Karl Jansky o Grote Reber hasta los desarrollos tecnológicos modernos, como VLA y ALMA, esta disciplina ha revolucionado la percepción del espacio.

Se describieron los fundamentos físicos que sostienen esta ciencia, incluyendo la ley de Rayleigh-Jeans para interpretar la emisión térmica, y se mencionan los radiotelescopios diseñados para detectar señales cósmicas débiles. Asimismo, se examinan los mecanismos de emisión térmicos y no térmicos, que facilitan la comprensión de los procesos astrofísicos.

Las contribuciones de la radioastronomía resultan evidentes: se ha cartografiado la estructura espiral de la Vía Láctea, se han identificado púlsares y se ha proporcionado evidencia crucial para la teoría del Big Bang mediante el CMB. Además de su impacto en la investigación, esta disciplina desempeña un papel significativo en la educación y la divulgación científica, inspirando a estudiantes y al público a explorar el Universo.

En este artículo ofrecemos una mirada general al papel de la radioastronomía en la comprensión del universo y en la formación de nuevas generaciones interesadas en la ciencia. Con su capacidad para revelar lo invisible, esta disciplina continúa siendo fundamental para explorar los grandes enigmas del cosmos y para inspirar a más personas a participar en la apasionante tarea de la investigación científica.

### Referencias bibliográficas

ALMA OBSERVATORY (2021). *Interferometría*.

<https://www.almaobservatory.org/es/sobre-alma/observando-con-alma/tecnologias/interferometria/>

ASTRON SCIENCE (2025). *LOFAR array configuration*.

<https://science.astron.nl/telescopes/lofar/lofar-system-overview/technical-specification/lofar-array-configuration/#pid=1>

Ancient pages (2016). *On This Day In History: Grote Reber, Great Amateur Astronomer And Ham*

*Radio Operator Born*.

<https://www.ancientpages.com/2016/12/22/on-this-day-in-history-grote-reber-great-amateur-astronomer-and-ham-radio-operator-born-on-dec-22-1911/>

Burke, B. F., & Graham-Smith, F. (2019). *An introduction to radio astronomy* (4th ed.). Cambridge University Press.

CIENTEC (2023). *Radiaciones electromagnéticas*.

<https://cientec.or.cr/articulos/radiaciones-electromagneticas>

Condon, J. J., & Ransom, S. M. (2016). *Essential radio astronomy*. Princeton University Press.

Draine, B. T. (2011). *Physics of the interstellar and intergalactic medium*. Princeton University Press.

Event Horizon Telescope Collaboration. (2019). First M87 Event Horizon Telescope results. *The Astrophysical Journal Letters*, 875, L1–L6.

Gray, M. D. (2012). *Masers and lasers: An astrophysical perspective*. Cambridge University Press.

Hulse, R. A., & Taylor, J. H. (1975). Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophysical Journal*, 195, L51.

ICRAR (2016). *Astrophysicists map the Milky Way*.  
<https://www.icrar.org/hi4pi/>

International Astronomical Union. (2020). *IAU strategic plan for astronomy education and development 2020–2030*. IAU Commission C1.

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). (2022). Divulgación de la radioastronomía en México: Proyectos y retos.

IAC (2018). *Nuevos datos de la misión espacial Planck refuerzan el actual modelo del Universo*.  
<https://www.iac.es/es/divulgacion/noticias/nuevos-datos-de-la->

[mision-espacial-planck-refuerzan-el-actual-modelo-del-universo](#)

Longair, M. S. (2011). *High energy astrophysics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Morven Museum & Garden (s.f), *Karl Jansky*.  
<https://www.morven.org/online/m-a-bell/gallery3/jansky>.

MPIFR (2025). *Impressions from Effelsberg*. <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/3404963/gallery>

National Radio Astronomy Observatory (2025). *The Wye of the VLA*.  
<https://public.nrao.edu/gallery/this-is-the-vla-wye/>

National Radio Astronomy Observatory (NRAO). (2023). *Educational programs and opportunities*.  
<https://public.nrao.edu/outreach/>

Penzias, A. A., & Wilson, R. W. (1965). A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. *Astrophysical Journal*, 142, 419–421.

Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.

SINC (2024). *Nuevas imágenes del agujero negro M87\* muestran las variaciones en su anillo*. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Nuevas-imagenes-del-agujero-negro-M87-muestran-las-variaciones-en-su-anillo>

Sofue, Y., & Rubin, V. (2001). Rotation curves of spiral galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 39, 137–174.

Sullivan, W. T. III. (2009). *The early years of radio astronomy: Reflections fifty years after Jansky's discovery*. Cambridge University Press.

Thompson, A. R., Moran, J. M., & Swenson, G. W. (2017). *Interferometry and synthesis in radio astronomy* (3rd ed.). Springer.

Vega, L. Mg (2022). *Radiotelescopios, tecnología de Telecomunicaciones de alto nivel*. <https://telecomunicaciones.edu.ec/repositorio/articulos-blog/ciencia-y-tecnologia/radiotelescopios-tecnologia-de-telecomunicaciones-de-alto-nivel>

Wilson, T. L., Rohlfs, K., & Hüttemeister, S. (2013). *Tools of radio astronomy* (6th ed.). Springer.

Wootten, A., & Thompson, A. R. (2009). The Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA): Overview and status. *IEEE Proceedings*, 97(8).