

# Diseño de un radiotelescopio para la observación de radiación de fondo a 1.42 GHz basado en Radio Definida por Software

Francisco Giménez-Cordellat  
Depto. de Ingeniería Electrónica  
Universitat de València  
Burjassot, Spain  
gicor@alumni.uv.es

Càndid Reig  
Depto. de Ingeniería Electrónica  
Universitat de València  
Burjassot, Spain  
ORCID: 0000-0001-8029-0068

Enrique Navarro-Camba  
Depto. de Informática  
Universitat de València  
Burjassot, Spain  
ORCID: 0000-0001-8365-0233

**Resumen**—In this document we describe the design and the assembly process of a radio telescope based on Software Defined Radio (SDR), as well as the experimental characterization of the horn antenna in an anechoic chamber. The process of observation and analysis of the spectral line of hydrogen, received by means of the radio telescope, is also explained.

**Index Terms**—Radiotelescopio, antena de bocina, SDR, línea de hidrógeno.

## I. INTRODUCCIÓN

La línea del hidrógeno es una línea espectral resultado de una transición, experimentada por un átomo de hidrógeno neutro, entre dos niveles energéticos específicos [1], en concreto, desde un nivel de mayor energía a otro de menor energía. Para deshacerse de este exceso de energía, el átomo radia una línea espectral a una frecuencia concreta (depende de la energía de transición asociada), en este caso, de 1420.405 MHz (longitud de onda de 21.12 cm) [2]. Estudiando esta línea, su forma y su ubicación espectral, se puede obtener información diversa sobre la región en la cual se genera [1]. El hidrógeno neutro se desplaza, en forma de nubes, por el interior de nuestra galaxia la Vía Láctea (Fig. 1). Principalmente se distribuye por el medio interestelar del disco de la galaxia, acumulándose en los brazos en espiral [3]. A pesar de que la densidad de estas nubes es muy baja (en término medio, 1 átomo por cada  $\text{cm}^3$ ), éstas son muy numerosas debido al enorme tamaño del disco de la galaxia.

Para la medición de la línea de hidrógeno y otras muchas fuentes de radiación electromagnética ubicadas fuera del sistema solar, se hace uso de radiotelescopios. Un radiotelescopio está formado por una antena de gran ganancia (habitualmente parabólica) y un radioreceptor que permite captar y registrar las ondas de radio recogidas por la antena. Estos instrumentos son extraordinariamente caros debido, por una parte, al gran tamaño de las antenas utilizadas (decenas de metros de diámetro) y a la complejidad de los sistemas radioreceptores.

Recientemente, la aparición de los sistemas SDR (Software Defined Radio), han permitido reformular el diseño de muchos de los módulos que conforman un instrumento de radiofrecuencia. El concepto de radio definida por software puede defi-

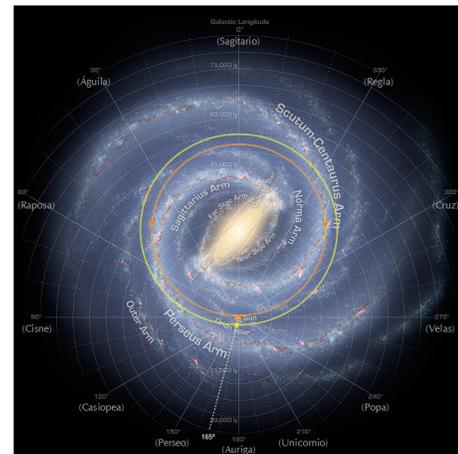


Figura 1. Representación de la Vía Láctea (vista desde el Polo Norte Galáctico) y las orbitas del Sol y la nube hidrógeno.

nirse como una radio digital en la que diversas funcionalidades del sistema se pueden reconfigurar mediante software. Esto es, componentes que típicamente se implementaban en hardware, ahora pueden definirse mediante software (como pueden ser los moduladores, demoduladores, mezcladores, etc.). Esto permite un más fácil procesamiento de la señal, dotando al sistema de una mayor flexibilidad y permitiendo la mejora en el rendimiento sin necesidad de reemplazar el hardware [4] [5]. Existe una amplia variedad de dispositivos de SDR en el mercado, que pueden usarse como escáneres, receptores de señales de radio en vivo o incluso como transmisores.

El objetivo de este trabajo es el diseño y construcción de un radiotelescopio económico, capaz de recibir la línea espectral de hidrógeno neutro de 1.42 GHz procedente de nuestra galaxia, la Vía Láctea.

## II. DISEÑO

El esquema de este instrumento incluye una antena adecuada para la recepción de la frecuencia de interés, además de una etapa de filtrado y amplificación conveniente que

ofrezca una buena relación señal/ruido y un módulo SDR como dispositivo receptor, con su software para ordenador asociado, que permita una correcta transformación y procesado de la señal. Un diagrama simplificado del sistema completo del radiotelescopio puede verse en la Fig. 2.

## II-A. Antena

Se ha considerado el uso de una bocina rectangular como antena dado que estas ofrecen una ganancia suficiente para nuestro propósito, a la vez que permiten una fabricación abordable con recursos limitados. Una antena de bocina está formada por una guía de ondas, su correspondiente elemento excitador y la propia bocina.

*II-A1. Guía de ondas:* Una guía de ondas rectangular tiene una frecuencia de corte ( $f_c$ ) (1) inferior dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

donde  $\epsilon$  es la permitividad dieléctrica del medio que rellena la guía y  $\mu$  su permeabilidad magnética y  $a$  y  $b$  son el ancho y el alto de la sección rectangular de la guía.

En nuestro caso, la frecuencia de interés (1420.4 MHz), debido al efecto Doppler producido por el movimiento relativo de las nubes de hidrógeno respecto a la Tierra, puede desplazarse  $\pm 2$  MHz, por lo que debe considerarse un rango de frecuencias desde 1418.4 MHz hasta 1422.4 MHz. Asumiendo que se propague únicamente el modo dominante  $TE_{10}$ , el cual presenta la menor atenuación [6], la frecuencia de corte de la guía será:

$$f_c = f_{c_{TE_{10}}} = \frac{c}{2a} \quad (2)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. Tomaremos el convenio habitual de que  $b = \frac{a}{2}$ . En la práctica se respetan unos márgenes de  $0.25f_c$  y  $0.1f_c$ , por encima y por debajo de  $f_c$ , respectivamente [7], para asegurar la correcta propagación únicamente del modo principal. Con todo, se ha obtenido:  $a = 16,36$  cm y  $b = 8,32$  cm.

*II-A2. Poste excitador:* Como elemento de transición entre la guía de ondas y el cable coaxial de alimentación se utiliza un poste excitador [8] que consiste en un monopolo vertical (medio dipolo) sobre un plano de masa, que en este caso se corresponde con el plano conductor metálico. En la Fig. 4 se muestra un diagrama de la sección longitudinal de la guía de ondas junto con el poste. Este elemento debe ubicarse a una distancia  $d = \lambda_g/4$  de la pared trasera [7]. Así, la longitud del poste será de  $l = \lambda/4 = 5,25$  cm y se situará a  $d = \lambda_g/4 =$

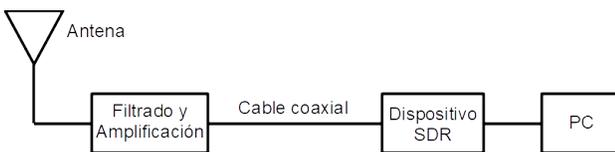


Figura 2. Esquema básico del sistema del radiotelescopio.

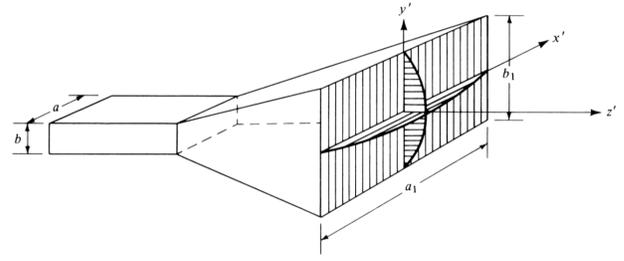


Figura 3. Esquema de la bocina piramidal.

Tabla I  
DIMENSIONES BOCINA

$G_0 = 13$ dBi		$G_0 = 18$ dBi		$G_0 = 23$ dBi	
$a_1$ ' /	43.8 cm	$a_1$ ' /	75.45 cm	$a_1$ ' /	132.19 cm
$b_1$ ' /	31.61 cm	$b_1$ ' /	58.02 cm	$b_1$ ' /	104.72 cm
$\rho_e$ ' /	23.65 cm	$\rho_e$ ' /	79.68 cm	$\rho_e$ ' /	259.6 cm
$\rho_h$ ' /	30.27 cm	$\rho_h$ ' /	89.85 cm	$\rho_h$ ' /	275.79 cm
$P_e$ ' /	12.96 cm	$P_e$ ' /	63.57 cm	$P_e$ ' /	234.07 cm
$P_h$ ' /	12.96 cm	$P_h$ ' /	63.57 cm	$P_h$ ' /	234.07 cm
$\psi_e$ ' /	41.93 °	$\psi_e$ ' /	21.35 °	$\psi_e$ ' /	11.64 °
$\psi_h$ ' /	46.33 °	$\psi_h$ ' /	24.83 °	$\psi_h$ ' /	13.87 °

6,84 cm de la pared del fondo de la guía. La longitud de la guía de ondas considerada es de  $h = 25$  cm [9].

*II-A3. Bocina:* La bocina es una transición gradual de la guía de ondas que mejora la directividad y adaptación de la antena [10]. Siguiendo el proceso de diseño descrito en [11], para tres posibles ganancias (13 dBi, 18 dBi y 23 dBi) y una longitud de onda de  $\lambda = 21,12$  cm, se obtienen tres posibles dimensiones de la bocina (Tabla I). Buscando un compromiso entre tamaño y ganancia, se ha optado por el diseño de la bocina con ganancia  $G_0 = 18$  dBi (Tabla I).

## II-B. Sistema de recepción

El sistema de recepción está formado por un amplificador de bajo ruido (LNA, Low Noise Amplifier) específico para aplicaciones a 1.42 GHz, un cable coaxial y un módulo SDR que se conecta a un ordenador portátil, además de varios conectores de tipo SMA (SubMiniature version A) para la interconexión de algunos de los elementos.

*II-B1. Amplificador, LNA:* Se utiliza el módulo SAWbird + H1m de la compañía Nooelec, que se conecta a la salida de la antena mediante un conector SMA (macho-macho). Esta formado por dos LNA y un filtro SAW (Surface Acoustic Wave filter) de alto rendimiento entre ambos. Presenta una ganancia de 40 dB en la banda de paso y una figura de ruido máxima de  $F = 0,9$  dB. Sus especificaciones detalladas pueden consultarse en [12].

*II-B2. Cable coaxial:* El LNA y el dongle SDR se conectan a través de un cable coaxial RG174/U de 2.6 mm de diámetro exterior y 3 metros de longitud. Se suponen unas pérdidas aproximadas del cable de 3 dB.

*II-B3. Dispositivo SDR:* Se ha utilizado el *dongle* RTL-SDR Blog V3, que es un receptor SDR de banda ancha basado en el chipset RTL2832U, con sintonizador R820T2. La

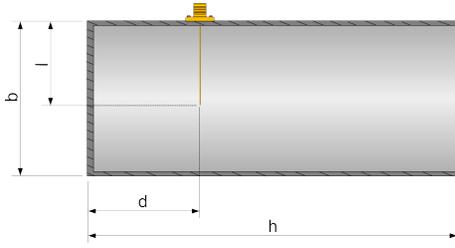


Figura 4. Vista lateral de la guía de ondas con el poste excitador y el conector.

figura de ruido ( $F$ ) del sintonizador R820T2, para la máxima ganancia, es de 3.5 dB [13]. Tiene una buena relación calidad-precio y, unas adecuadas prestaciones [14]:

*II-B4. Análisis del sistema de recepción:* Suponiendo unas pérdidas totales en los conectores de 0.5 dB [15] y una ganancia de 18 dB, puede calcularse la ganancia total (mínima) hasta el SDR:

$$G = G_{\text{ant}} + G_{\text{LNA}} + L_{\text{cable}} + L_{\text{conect}} \quad (3)$$

$$= 18 \text{ dB} + 40 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 0,5 \text{ dB} = 54,5 \text{ dB}$$

### III. IMPLEMENTACIÓN

Se describe en los próximos párrafos el proceso de construcción y montaje de las partes del sistema que lo requirieron.

#### III-A. Antena

La antena se ha fabricado con láminas de aluminio unidas entre sí mediante ángulos de aluminio, tornillos, tuercas y arandelas. Para su construcción, se han tomado las dimensiones obtenidas en la Tabla I ( $G_0 = 18 \text{ dB}$ ), obteniendo cinco piezas (cuatro lados y fondo) que, después de doblar adecuadamente los laterales, se han ensamblado. En la Fig. 5 se muestra la antena de bocina construida, a la que se le ha añadido una pequeña plataforma donde posar el módulo LNA. Se ha reforzado la boca de la bocina con ángulos de PVC para que no se arqueen las planchas de aluminio, y se ha construido una base para que la antena no se desequilibre. Finalmente, se ha insertado el elemento excitador tras haber practicado en el techo de la guía de ondas un agujero de las dimensiones correctas.

#### III-B. Materiales y presupuesto

En la Tabla II se muestra el presupuesto aproximado de los principales materiales y dispositivos utilizados para la construcción del radiotelescopio.

### IV. CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA

La antena ha sido convenientemente caracterizada, tanto eléctricamente (parámetro  $S_{11}$ ) como en radiación (diagrama y ganancia).

Tabla II  
MATERIALES Y PRESUPUESTO

Materiales	Unidades	Precio/u	Precio
Plancha aluminio (1000x2000x1 mm)	1	29.81€	29.81€
Ángulo aluminio (2.6 m) (15x15x1.3 mm)	2	3.85€	7.70€
Ángulo PVC (2.6 m) (20x20x1 mm)	2	3.60€	7.20€
Conector SMA antena (50Ω) (Hembra-Macho)	1	7.08€	7.08€
Conector SMA recto (50Ω) (Macho-Macho)	1	12.09€	12.09€
Terminador de RF (50Ω) (Macho)	1	3.47€	3.47€
Nooelec SAWbird+H1 + SMA recto (M-M)	1	51.95€	51.95€
RTL-SDR Blog V3 + Cable coaxial (3m)	1	34.95€	34.95€
Tornillería (3mm)	-	-	6.90€
Cinta aluminio	-	-	4.22€
Materiales soporte antena	-	-	10.36€
<b>TOTAL</b>			<b>175.73€</b>

#### IV-A. Parámetro $S_{11}$

Se mide el parámetro  $S_{11}$  en el interior de la cámara anecoica utilizando el analizador de redes vectorial portátil *PocketVNA* [16]. En la Fig. 6 se muestra el parámetro  $S_{11}$  medido, del que se observa una mejor adaptación a frecuencias ligeramente superiores a la frecuencia de interés. El coeficiente de reflexión que a 1.42 GHz de -11.63 dB.

#### IV-B. Diagramas de radiación

Los diagramas de radiación de los planos H y E han sido medidos en el interior de una cámara anecoica. En la Fig.7 se muestra la antena de bocina sujeta al posicionador de la cámara anecoica con la orientación adecuada para la medición del diagrama de radiación del plano E. Para la medición del plano H, se rotan ambas antenas (transmisor y receptor) 90° sobre su eje (para mantener la adaptación de polarización). En las Fig. 8 y 9 se muestran, respectivamente, los diagramas de radiación de los planos H y E resultantes de las mediciones, comparados con los obtenidos en simulación. A partir de estos diagramas normalizados medidos, se puede estimar la



Figura 5. Antena de bocina descansando sobre el soporte.

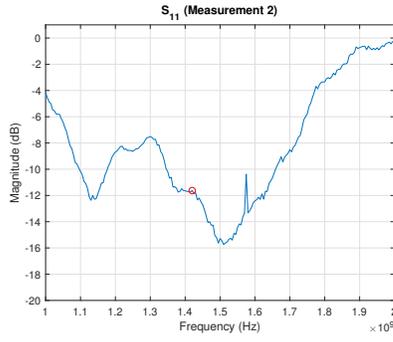


Figura 6. Parámetro  $S_{11}$  medido en la cámara anecoica.

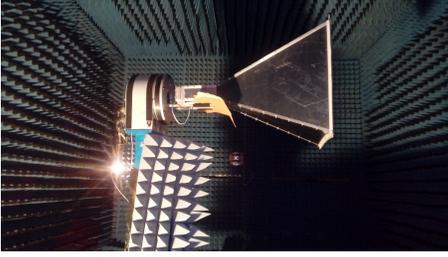


Figura 7. Antena de bocina instalada en el posicionador de la cámara anecoica.

directividad aproximada de la antena de bocina, dado que esta presenta un lóbulo principal estrecho, con lóbulos secundarios menores:

$$D \approx \frac{4\pi}{\Omega_e} = \frac{4\pi}{\frac{38\pi}{180} \cdot \frac{17\pi}{180}} = 63,86 \rightarrow D \approx 18 \text{ dBi} \quad (4)$$

siendo  $\Omega_e$  el ángulo sólido obtenido del producto de los HPBW del plano  $E$  y plano  $H$  extraídos de las figuras 8 y 9. Asumiendo una eficiencia de la antena del 100% se tiene, por tanto, una ganancia  $G \approx 18$  dBi, igual a la directividad.

## V. RESULTADOS

La observación consistió en mantener el radiotelescopio apuntando al zenit en modo de recepción continua, durante aproximadamente un día completo. Para el registro de las medidas se usó el software SDR *SDRSharp* [17], que es compatible con el chipset RTL2832U del RTL-SDR Blog V3. Se instaló el plugin *IF Average* [18], para poder promediar muchas muestras a lo largo del tiempo, para poder extraer el pico de la línea de Hidrógeno del fondo de ruido. Se utilizó en paralelo el programa *Stellarium* [19] para relacionar la intensidad de la línea de hidrógeno observada con la región celeste de la que procede, y las herramientas *Chronolapse* [20] y *Time-Lapse Tool* [21] para capturar instantáneas del estado cielo-espectro de forma automática y periódica, y posteriormente conformar una animación a velocidad rápida con ellas. En [18] se explica el procedimiento para la configuración de los programas *SDRSharp* y *Stellarium* para la observación y se expone como realizar la calibración de la aplicación *IF Average*.

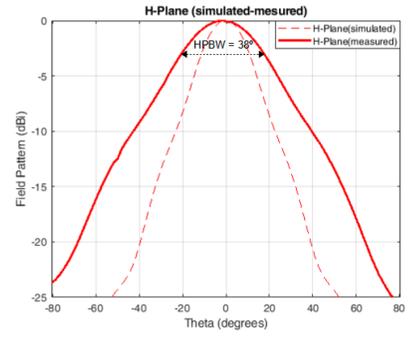


Figura 8. Diagrama de radiación del plano H (medido y simulado).

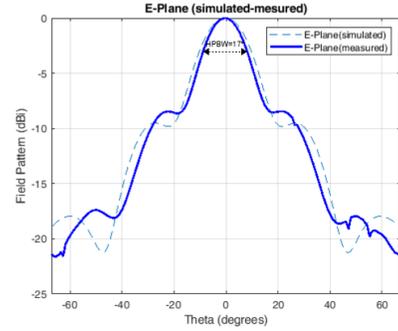


Figura 9. Diagrama de radiación del plano E (medido y simulado).

De la concatenación de todas las instantáneas cielo-espectro obtenidas durante un día completo<sup>1</sup>, se observó que, cuando el disco de la Vía Láctea transcurre por la parte del cielo hacia la que apunta el radiotelescopio, la línea espectral de hidrógeno se recibe con más potencia. Mientras que cuando apunta hacia zonas externas al disco de la galaxia, la intensidad de la línea disminuye y se vuelve casi inapreciable. Esto concuerda con lo comentado sobre la localización principal de las nubes de hidrógeno en los brazos de nuestra galaxia.

En la Fig. 10 se muestra la imagen de la línea de hidrógeno recibida en un momento en el que el radiotelescopio apunta hacia el disco de la Vía Láctea, en concreto hacia una longitud galáctica aproximada de  $165^\circ$ , en la dirección de la constelación de Auriga. La frecuencia a la que se observa el pico de la línea de hidrógeno (1420.529 MHz) es ligeramente superior a la esperada (1420.405 MHz), es decir, se ha desplazado hacia el azul. Esto significa que la distancia entre la nube de hidrógeno y nosotros se está reduciendo, ya sea porque la nube se acerca a nosotros o viceversa.

Este desplazamiento de la línea en el espectro es proporcional a la velocidad radial relativa entre emisor y observador (Efecto Doppler) y se expresa en Eq. 5, donde  $v_r$  es la velocidad radial,  $f_e$  la frecuencia emitida,  $f_o$  la frecuencia observada y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

$$v_r = c \frac{f_e - f_o}{f_o} \quad (5)$$

<sup>1</sup>El vídeo puede verse en <https://cutt.ly/GAk5mV3>

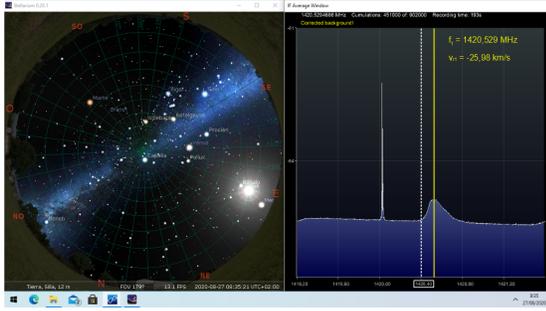


Figura 10. Instantánea donde se observa la línea de hidrógeno.

Por tanto, la velocidad radial relativa, en esta situación, es:

$$v_{r1} = 3 \cdot 10^8 \frac{1420,406 - 1420,529}{1420,529} \approx -25,98 \text{ km/s} \quad (6)$$

La velocidad negativa indica el acercamiento entre emisor y observador, sin embargo este acercamiento no tiene por que ser en la dirección de la línea de visión entre ambos. Al ver la dirección hacia la que se está observando dentro de la galaxia (Fig. 1), se entiende que la nube de hidrógeno emisora debe encontrarse en una órbita (alrededor del centro galáctico) ligeramente exterior a la nuestra (Sol), probablemente en el mismo brazo de Orión. Se asume que la velocidad de translación de los objetos alrededor del centro galáctico (en el disco), por lo general, disminuye conforme el radio de la órbita aumenta [22]. Por tanto, se considera que somos nosotros los que estamos alcanzando a la nube de hidrógeno, ya que nos movemos a una velocidad mayor que ésta (desplazándose cada uno por su propia órbita). Esto concordaría con la curvatura que dibujan los brazos de la Vía Láctea arrastrados por su rotación, que se produciría en sentido horario (desde la vista de la Fig. 1).

Con todo, los cálculos de velocidades radiales se consideran una aproximación, ya que no se está teniendo en cuenta el propio movimiento de la Tierra, tanto de rotación como de translación alrededor del Sol.

## VI. ASPECTOS PEDAGÓGICOS

Desde el punto de vista pedagógico, un proyecto como el descrito supone en sí mismo una experiencia docente que aglutina una buena parte de las muchas vertientes de la electrónica, desde sus fundamentos (tanto analógicos como digitales, y su conversión), a su aplicación en telecomunicaciones y sistemas de comunicación, desarrollando para ello un instrumento electrónico funcional. Además de las competencias básicas requeridas al alumnado que cursa el Grado en Ingeniería Electrónica de Telecomunicación, el desarrollo del presente trabajo permite valorar muchas de las competencias generales y algunas de las específicas. Es por ello que tanto el proceso global de diseño del instrumento como su propio uso pueden ser considerados en el diseño de los contenidos de algunas de las asignaturas del grado como: *Expresión gráfica* (diseño de la antena de bocina), *Física II* (ondas electromagnéticas),

*Fundamentos de comunicaciones, Sistemas electrónicos de telecomunicación* (guías de ondas, SDR) o *Circuitos y sub-sistemas de alta frecuencia* (amplificadores RF).

## VII. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la viabilidad de construir un radiotelescopio de bajo coste formado por una antena de bocina de aluminio, un amplificador y un módulo SDR conectado a un PC. Se ha evidenciado la funcionalidad del instrumento midiendo la línea de hidrógeno (1.42 GHz) proveniente de la vía láctea.

## REFERENCIAS

- [1] V. J. Martínez, J. A. Miralles, E. Marco and D. Galadí-Enriquez, "La radiación y su estudio," in *Astronomía fundamental*. Valencia, Spain: PUV, 2005, ch 5.
- [2] G. L. Verschuur, "Interstellar Hydrogen," in *The invisible universe. The story of radio astronomy*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2007, ch 6.
- [3] ALDA. "La vía láctea." Tayabeixo.org [http://www.tayabeixo.org/via\\_lactea/vialactea.htm](http://www.tayabeixo.org/via_lactea/vialactea.htm).
- [4] "About RTL-SDR." RTL-SDR.com. <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>.
- [5] G. Youngblood, Ed., "A software-defined radio for the masses, part 1," in *QEX*, Jul/Aug. 2002. [Online]. Available: <http://www.arrl.org/files/file/Technology/tis/info/pdf/020708qex013.pdf>.
- [6] D. K. Cheng, "Guías de ondas y cavidades resonantes," in *Fundamentals of engineering electromagnetics*, Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1993 (Transl: *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Mexico: Addison-Wesley, 1997, ch 9).
- [7] J. J. Condon and S. M. Ransom, "Radio telescopes and radiometers," in *Essential radio astronomy*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2018, ch. 3. [Online]. Available: <https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch3.html>
- [8] T. S. Bird, "Feed antennas," in *Modern antenna handbook*, A Balanis, Ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.
- [9] N. A. Patel et al., "A low-cost 21 cm horn-antenna radio telescope for education and outreach," [Online]. Available: <https://web.cfa.harvard.edu/~npatel/hornAntennaAASposterPDF2.pdf>
- [10] A. Cardama, "Aperturas," in *Antenas*, 2nd ed. Barcelona, Spain: Ediciones UPC, 2002, ch 6.
- [11] C. A. Balanis, "Horn antennas," in *Antenna theory*, 2th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005, ch 13.
- [12] *SAWbird+H1m (LNA) Nooelec*. [Online]. Available: [https://www.nooelec.com/store/downloads/dl/file/id/97/product/322/sawbird\\_h1\\_datasheet\\_revision\\_1.pdf](https://www.nooelec.com/store/downloads/dl/file/id/97/product/322/sawbird_h1_datasheet_revision_1.pdf)
- [13] *High performance low power advanced digital TV silicon tuner datasheet*. [Online]. Available: [https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T\\_datasheet-Non\\_R-20111130\\_unlocked1.pdf](https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked1.pdf)
- [14] *RTL-SDR blog V3 datasheet*. [Online]. Available: <https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2018/02/RTL-SDR-Blog-V3-Datasheet.pdf>
- [15] E. Trumbauer and S. Khashayar, "Welcome to...the astronomy zone!," Accessed: Mar. 5, 2022. [Online]. Available: [https://docs.google.com/document/d/1\\_7ZOe1Et\\_8QTK07bgbTd7LLNqDAtgAjmCS50JM9JRbQ/edit](https://docs.google.com/document/d/1_7ZOe1Et_8QTK07bgbTd7LLNqDAtgAjmCS50JM9JRbQ/edit)
- [16] PocketVNA.com. <https://pocketvna.com/> (accessed Mar. 5, 2022).
- [17] "SDRSharp users guide." RTL-SDR.com. <https://www.rtl-sdr.com/sdrsharp-users-guide/>.
- [18] "Cheap and easy hydrogen line radio astronomy with an RTL-SDR, WiFi parabolic grid dish, LNA and SDRSharp." RTL-SDR.com. <https://www.rtl-sdr.com/cheap-and-easy-hydrogen-line-radio-astronomy-with-a-rtl-sdr-wifi-parabolic-grid-dish-lna-and-sdrsharp/>
- [19] Stellarium.org. <https://stellarium.org/es/>
- [20] Chronolapse.com. <https://www.chronolapse.com/>
- [21] Timelapsetool.com. <https://timelapsetool.com/es>
- [22] Cosmo educa. "Física avanzada 4. Rotación de una galaxia espiral. La materia oscura." IAC.es. <https://www.iac.es/cosmoeduca/gravedad/fisica/fisica4.htm>
- [23] D. M. Pozar, "Transmission line and waveguides," in *Microwave engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012, ch 3.