

**Título del Proyecto
de Investigación a que corresponde el Reporte Técnico:**

Avances en la construcción de un radio telescopio para la línea
espectral de 21 cm del hidrógeno

Tipo de financiamiento

Sin financiamiento

Autores del reporte técnico:

Dr. Jesús Manuel Sáenz Villela
Dra. Karen Yael Castrejón Parga

Construcción de un radio telescopio para la línea de 21 cm del hidrógeno

Resumen del reporte técnico en español

Este reporte técnico detalla los avances de la construcción del radio telescopio para la línea espectral de 21 cm del hidrógeno. El reporte se basa en el entregado a la *Society of Physics Students*, la cual aprobó el proyecto presentado por el Grupo de Astronomía de la UACJ en diciembre de 2019. El radio telescopio tiene como objetivo detectar las emisiones de las transiciones de spin del hidrógeno galáctico. Como primera etapa ya concluida se tiene la construcción de un prototipo de radiotelescopio, con la que se han observado ya las señales de interés. Como etapa final, pero retrasada por la pandemia de COVID, se tiene la instalación de un radio telescopio en el IIT, con cuyas observaciones habrán de llevar las actividades de divulgación del Grupo de Astronomía de la UACJ al plano de la investigación.

Resumen del reporte técnico en inglés

This report gives the account of the construction of a radio telescope for the 21 cm hydrogen line. The report is based in the one submitted to the Society of Physics Students, who approved the project presented by Grupo de Astronomía UACJ in December 2019. The radio telescope has one of its objectives to detect the emission of the 21 cm hydrogen line due to spin transitions. As complete step in the construction, a prototype radio telescope has been constructed and signals of interest have been recorded. As a final step, delayed due to the COVID pandemic, we have the final installation of a fully operational, low-cost, radiotelescope in the IIT. The activities and observations will take the purely recreational activities of Grupo de Astronomía UACJ to a student-research level.

Palabras clave:

Astronomía, Radio telescopio, línea espectral del hidrógeno.

Usuarios potenciales

Las actividades del Grupo de Astronomía de la UACJ están destinadas a la comunidad de alumnos y profesores de la UACJ, y al público en general, ya que al igual que las Observaciones Astronómicas realizadas a lo largo del año, se tienen planeadas más charlas informativas y de divulgación.

Reconocimientos

Se agradece especialmente a los estudiantes que conforman el Grupo de Astronomía de la UACJ, cuyo entusiasmo y dedicación hicieron posible la realización de la primera etapa del proyecto de construcción de radio telescopio en el IIT.

1. INTRODUCCIÓN

La pregunta de investigación inicial del Grupo de Astronomía de la UACJ consiste en investigar si es posible tener un radio telescopio que ayude en las actividades de divulgación, principalmente a cargo de alumnos y profesores del programa de Ingeniería Física. El objetivo fundamental es desarrollar un radio telescopio funcional y de bajo costo, con el cual se ha estudiado la línea espectral del hidrógeno presente en la galaxia, la cual corresponde a una frecuencia de unos 1420 MHz. Al mismo tiempo, y con la operación y adquisición de datos, los alumnos involucrados en el capítulo estudiantil de la Society of Physics Students podrán dar un primer paso al campo de la investigación en radioastronomía. Se pretende seguir llevando al público en general a las actividades informativas como lo son las veladas y observaciones astronómicas, en las cuales han participado cientos de juarenses a lo largo de pocos años.

Este reporte detalla que se ha completado la fase preliminar de adquisición de datos y pruebas de software. Al momento del reporte, se trabaja en un segundo prototipo de radio telescopio en el cual se siguen haciendo pruebas para tener ya mayor confianza en la instalación y operación de la antena en el IIT, y en la adquisición de datos, en algún punto del 2021. Se tiene además que las pruebas en los prototipos les han permitido a los estudiantes resolver algunos detalles en cuanto a la adquisición de datos.

Debe hacerse notar en este reporte técnico que la pandemia de COVID-19 ha causado varios retrasos en la construcción del diseño final. No obstante, se han tenido importantes avances, como los que se detallan más adelante. Una vez que las autoridades gubernamentales y universitarias determinen que se pueden retomar las actividades, el Grupo de Astronomía de la UACJ habrá de continuar con los esfuerzos para concluir el proyecto. Debido al trabajo a distancia, el grupo de trabajo tuvo que reorganizarse para cumplir con el reporte de medio tiempo que se entregó a la Society of Physics Students, con el cual, el capítulo estudiantil en parte logró obtener el reconocimiento de capítulo distinguido.

Una de las metas de la Society of Physics Students, y del programa de Ingeniería Física, es lograr motivar la participación de la comunidad en actividades de investigación y de divulgación.

Por parte del Grupo de Astronomía, se tiene contacto con unos 90 alumnos del programa y se le ha brindado información para que conozcan las oportunidades que se tienen al pertenecer formalmente al capítulo estudiantil. Sin embargo, la pandemia ha impactado negativamente la cantidad y frecuencia de las reuniones, por lo que principalmente trabajó el núcleo básico del proyecto en un grupo de Teams durante casi todo el 2020. Se espera que, en el futuro inmediato, más estudiantes participen con proyectos similares a este y que más alumnos se incorporen a las actividades del capítulo estudiantil.

2. PLANTEAMIENTO

Antecedentes

La radio astronomía nace en los 1930 cuando Karl Jansky de los laboratorio Bell con señales en receptores operando en la región del los 20 MHz. Fue Grote Reber quien especuló sobre el origen de las señales y supuso que serian detectadas mas fácilmente a frecuencias mayores. Reber construyó un receptor y antena para una frecuencia de operación de 3000 MHz. Estas señales han permitido el radio mapeo del plano galáctico [1].

En 1945, Van de Hulst sugirió que la línea de 21 cm del hidrogeno atómico podría ser detectada en el espacio interestelar [2]. Al final de la segunda guerra mundial, las investigaciones iniciaron en Holanda y en Estados Unidos. La primera línea detectada en el medio interestelar fue por Ewan y Purcell, de la Universidad de Harvard [3]. Ambos informaron a sus colegas con el fin de corroborar las señales. Dos grupos, de Holanda y de Australia, habrían de confirmar los resultados [4]. Hay otros recuentos de la historia y antecedentes de la construcción de radiotelescopios, por ejemplo Kerr [5] y Sullivan [6]. El diseño original de corno de la antena usado por Purcell y Ewan se exhibe en el National Radio Astronomy Observatory en Greenbank, West Virginia. Es en este diseño de corno en el que se basa el segundo prototipo que está siendo construido por el Grupo de Astronomía de la UACJ.

Marco teórico

El principio físico de la emisión de la línea de transición se explica a través de la teoría de perturbaciones en mecánica cuántica, por lo que en este reporte técnico solo se dan algunos detalles de manera similar a la que se hacen en libros de texto introductorios a dicha materia, por ejemplo [7].

Se tiene que el momento magnético del protón y de electrón están dados por

$$\vec{\mu}_p = \frac{g_p e}{2m_p} \vec{S}_p \quad ; \quad \vec{\mu}_e = -\frac{e}{m_e} \vec{S}_e \quad (1)$$

donde e es la carga eléctrica del electrón, m_p y m_e son las masas del protón y del electrón, \vec{S}_p and \vec{S}_e , son los espines respectivos y g_p es el llamado factor-g, el cual es de 5.59 para el protón y de 2 para el electrón.

Dado que el protón y el electrón tiene el momento magnético indicado en la ecuación (1), se tiene que el campo magnético relacionado al dipolo magnético está dado por

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\vec{\mu} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{\mu}] + \frac{2\mu_0}{3} \vec{\mu} \delta^3(\vec{r}) \quad (2)$$

Donde $\delta^3(\vec{r})$ es la función delta de Dirac en tres dimensiones. Esto significa que la separación hiperfina del hidrógeno se produce debido al campo magnético producido por el dipolo magnético del protón. El Hamiltoniano de la perturbación a la que está sujeto el electrón está dada por

$$H_{hf}^1 = \frac{\mu_0 g_p e^2}{8\pi m_p m_e} \frac{[3(\vec{s}_p \cdot \hat{r})(\vec{s}_e \cdot \hat{r}) - (\vec{s}_p \cdot \vec{s}_e)]}{r^3} + \frac{\mu_0 g_p e^2}{3m_p m_e} \vec{s}_p \cdot \vec{s}_e \delta^3(\vec{r}) \quad \dots(3)$$

De acuerdo a la teoría de perturbaciones en mecánica cuántica, la corrección a primer orden en un sistema sin perturbación corresponde al valor esperado de Hamiltoniano con perturbación [8]. Lo anterior se expresa como

$$H_{hf}^1 = \frac{\mu_0 g_p e^2}{8\pi m_p m_e} \frac{[3(\vec{s}_p \cdot \hat{r})(\vec{s}_e \cdot \hat{r}) - (\vec{s}_p \cdot \vec{s}_e)]}{r^3} + \frac{\mu_0 g_p e^2}{3m_p m_e} \vec{s}_p \cdot \vec{s}_e \delta^3(\vec{r}) \quad \dots(4)$$

en donde se tiene que el primer término es cero, como puede demostrarse. Además, se tiene que

$$|\Psi(0)|^2 = \frac{1}{(\pi a)^3} \quad (5)$$

Por lo que la corrección a primer orden de la energía es

$$E_{hf}^1 = \frac{\mu_0 g_p e^2}{3m_p m_e (\pi a)^3} \langle \vec{s}_p \cdot \vec{s}_e \rangle \quad (6)$$

Dado que el spin total está dado por la suma de los espines del protón y del electrón, y dado que los protones y electrones son fermiones, se tiene que para el estado de espines paralelos (triplete) el espín total es 1. En el estado único, el espín total es 0. Por lo anterior, la corrección de la energía a primer orden en teoría de perturbaciones es

$$E_{hf}^1 = \frac{4g_p \hbar^2}{3m_p m_e c^2 a^4} \begin{cases} +\frac{1}{4} \text{ paralelo} \\ -\frac{3}{4} \text{ antiparalelo} \end{cases} \quad (7)$$

donde a es el radio de Bohr. Si se introducen las cantidades respectivas, se encuentra una diferencia de energía dada por

$$\Delta E = \frac{4g_p \hbar^2}{3m_p m_e c^2 a^4} = 5.88 \times 10^{-6} \text{ eV} \quad (8)$$

que corresponde a la energía del fotón emitido en la transición entre los estados paralelo y anti paralelo. Si se calcula la frecuencia del fotón, tenemos

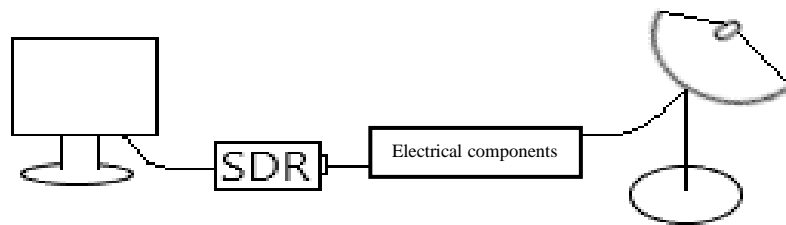
$$\nu = \frac{\Delta E}{\hbar} = 1420 \text{ MHz} \quad (9)$$

que corresponde a una longitud de onda de 21 cm, lo que conforma la línea de 21 cm del hidrogeno producida en el centro galáctico, la cual ha sido detectada por el primer prototipo de radio telescopio.

3. METODOLOGÍA

Los componentes principales del prototipo de radio telescopio son la antena, el receptor adecuado para la detección de la línea del hidrogeno, los componentes electrónicos para amplificar la señal y para reducir el ruido. Se presenta un diagrama con la configuración típica presente en este tipo de radio telescopios:

Figura 1. Conexión general de componentes



Se han usado dos antenas para los prototipos, con las cuales se tienen los resultados que se discuten más adelante. Una de las antenas consiste en una de 82.5 cm en su eje mayor y 72.5 cm en su eje menor. Es una antena de TV de cable, la cual se usa precisamente en cumplimiento de aprovechar materiales de bajo costo. Se tiene conectado a la antena un *Low Noise Block* (LNB) para la banda Ku (que va de los 12 a los 18 GHz), por lo que se reemplazó por un detector diseñado para captar la señal de interés. La otra antena es una parabólica de malla que tiene un receptor con frecuencia de 2278 MHz.

Se han estado usando dos receptores con características distintas. El primero es uno cónico con dimensiones de 21 cm de alto, 23 cm de diámetro y 10.5 cm de diámetro menor. Se fabricó con lamina y aluminio. Se muestra en la siguiente figura:

Figura 2. Receptor cilíndrico.



El otro receptor se muestra en la siguiente figura y tiene dimensiones de 16.5 cm x 8.25 cm y puede recibir frecuencia entre los 1.12 GHz y los 1.70 GHz. Está fabricado a base de cartón recubierto de aluminio y está protegido con cinta adhesiva.

Figura 3. Receptor rectangular.



Ambos receptores tienen una sonda de sección de 2mm de cobre y tiene una longitud de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda correspondiente a los 1420 MHz y esta colocada a $\frac{1}{4}$ de longitud de onda desde el fondo del receptor. Esta sonda está conectada a un conector coaxial para ser conectada mediante cable coaxial al resto del equipo.

Para los componentes electrónicos usamos un Amplificador de Bajo Ruido (LNA, por sus siglas en inglés) y dos filtros (BPF), uno de 1380 MHz y el otro de 1445 MHz; estos componentes se muestran en la siguiente figura:

Figura 4. LNA (izquierda), BPF de 1445 MHz (centro), BPF de 1380 MHz (derecha).



El primer componente que se conectó fue el LNA. Esto amplifica la frecuencia central de 1420 MHz y reduce el ruido de base detectado. Es importante colocar el LNA cerca del receptor para evitar que un cable coaxial largo incremente el ruido. Luego del LNA, se conecta el BPF de 1445 MHz y opera en el intervalo de 1420 a 1470 MHz. Luego se conecta el BPF de 1380 MHz de frecuencia central y opera en el intervalo de 1349 a 1420 MHz. Los filtros se suponen aminoran la señal alrededor de la frecuencia central e 1420 MHz.

Para convertir la señal análoga de la antena y receptor a señal digital, y para poder analizarla con el software, se requiere el uso de un dispositivo Software Define Radio (SDR). En nuestro caso usamos un dispositivo llamado RTL-SDR, y se muestra en la siguiente figura:

Figura 5. RTL-SDR.



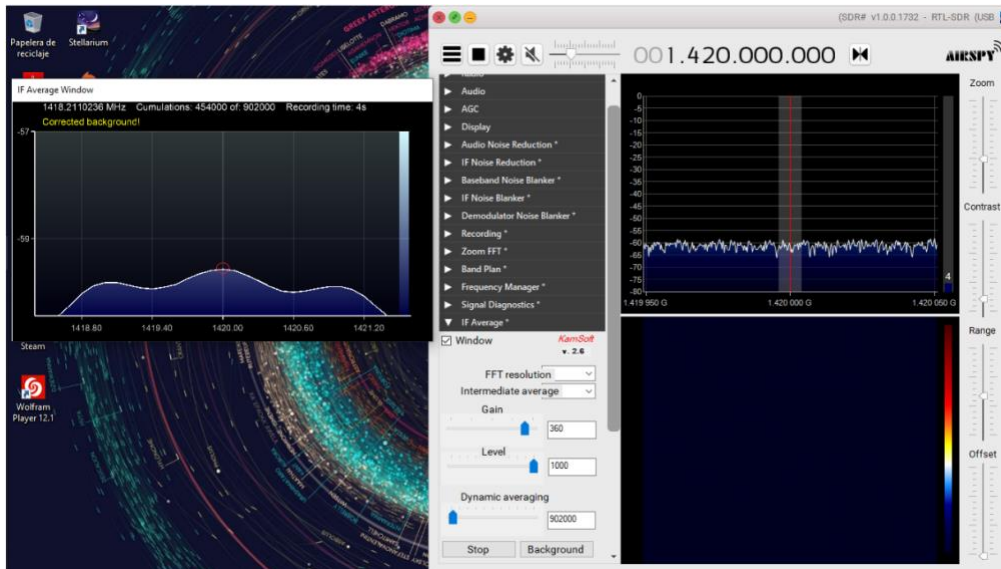
Una vez que se tiene la señal digital, se usa el software *Airspy*. Este software contiene algunas herramientas útiles en el análisis de la señal. En nuestro caso, nos concentramos en el uso de SDR-SHARP. Este programa muestra la señal en tiempo real, pero se requiere del análisis de un periodo largo de tiempo. Para lograr esto, se instala el plugin *If Average*, que es una herramienta que sirve para calcular el promedio del espectro para un periodo de tiempo determinado.

Antes de iniciar la captura de datos, se requiere calibrar el equipo. Para lograr esto se debe ajustar los parámetros para el promedio, desconectar la antena del resto de los componentes y esperar a que el software concluya el proceso. Una vez que lo hace, se conecta la antena para iniciar la recolección de datos durante un intervalo de 5 a 10 minutos para evitar sobrecalentar los componentes.

4. RESULTADOS

La primera toma de datos fue con la antena conectada al receptor cilíndrico. Se usó el plug-in *If Average* y se ajustaron los parámetros. Se tiene la señal detectada en la siguiente figura:

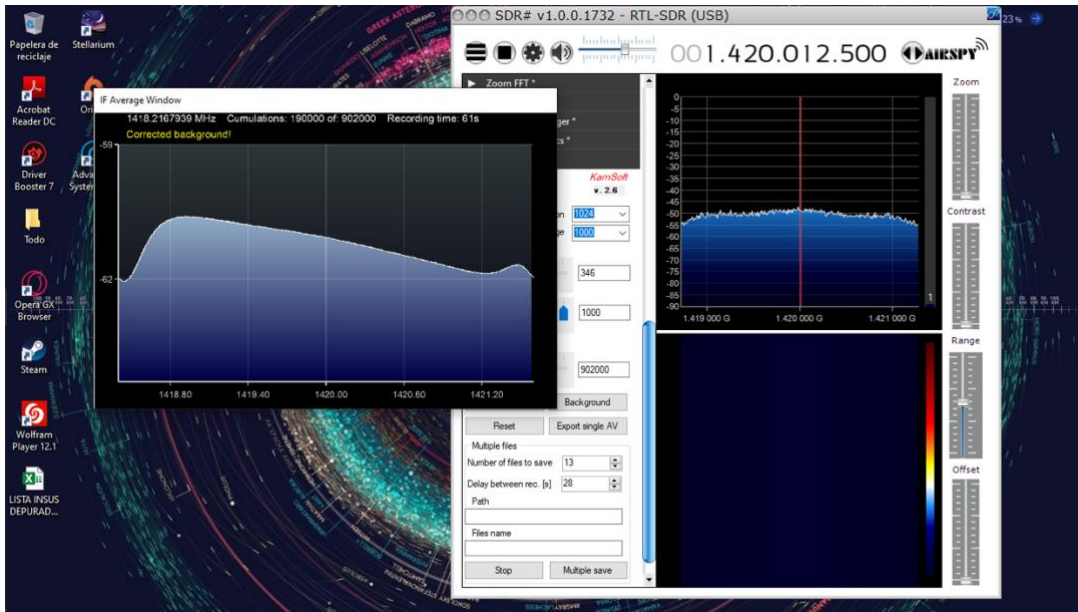
Figura 6. Señal captada con la antena y con el receptor cilíndrico



Con este arreglo del equipo, la señal se ve muy débil. Nótese que, en el cuadro superior derecho de la figura, no se aprecia el pico en 1420 MHz, por lo que se sospecha del receptor; las dimensiones de los receptores deben ser específicas para cada arreglo, como lo concluyó el grupo de trabajo.

Se procedió a cambiar el detector cilíndrico por el rectangular. El resto del equipo se conectó de la misma manera y se tienen los resultados en la siguiente figura:

Figura 7. Señal captada con la antena y con el receptor rectangular

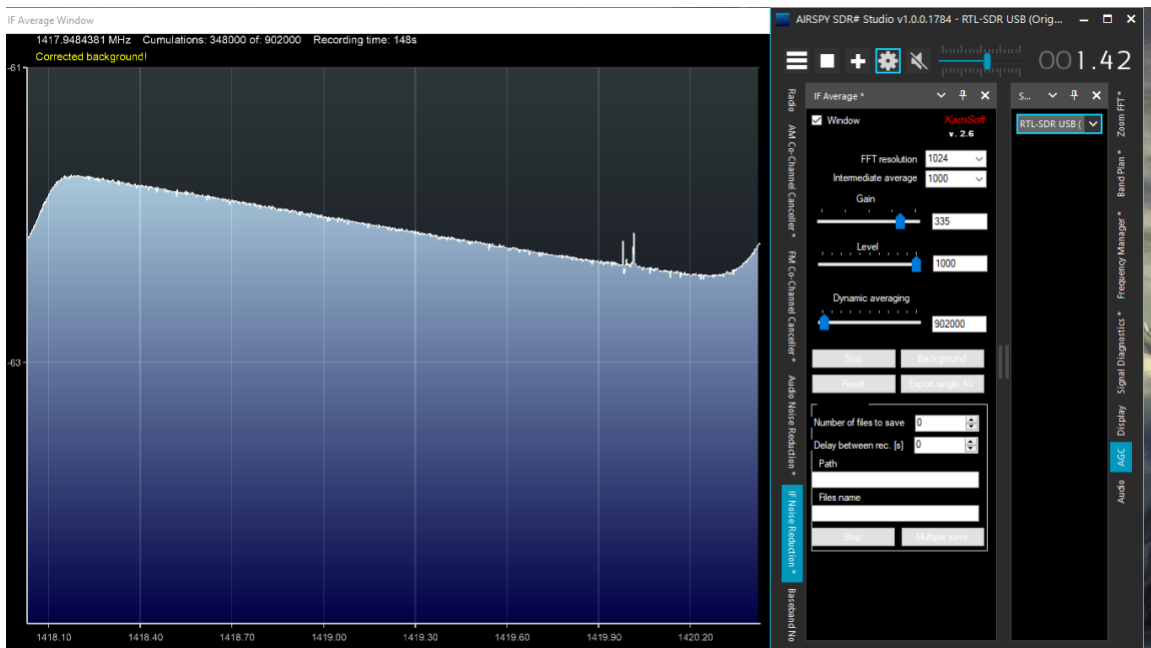


El pico de la señal parece tener una mayor presencia en este arreglo, pero sigue siendo poco visible. Es en este momento en que el grupo de trabajo decide cambiar la antena para las siguientes pruebas. Se usó a continuación la antena parabólica de malla. El resto de los componentes se colocaron de la misma forma. Se muestra en la figura la señal obtenida:

Figura 8. Señal captada con la antena parabólica.



Figura 9. Señal captada con el uso de dos LNA



5. CONCLUSIONES

Dado que se hicieron 3 pruebas de recolección de datos y no se detectó el pico en 1420 MHz, el grupo de trabajo concluyó que la antena no produce una señal lo suficientemente notoria y que el amplificador no es capaz de mejorarla. Debido a esto, se decidió probar las señales con dos amplificadores LNA con frecuencia central de 1420 MHz y conectados con el resto de los componentes. Además, se optó por mejorar el diseño de la antena. Se tiene resultados prometedores; la figura 9 muestra la señal con picos notorios en la frecuencia que se espera observarlos, se observan dos picos cercanos a 1420 MHz. Se sabe que el efecto Doppler está presente en la señal y ya se ha documentado la presencia de los dos picos, uno que corresponde a una porción de la galaxia que se acerca al detector y otra que corresponde a la porción de la galaxia que se aleja al detector, por lo que se obtienen dos picos [9]. Sin embargo, se espera poder mejorar la calidad de la señal.

Otra conclusión a la que los autores de este reporte llegan es que los alumnos del grupo de trabajado inicialmente basaron sus medidas en prototipos similares que se encuentran en internet. Pero cabe señalar que, de hacer alguna modificación, aunque parezca pequeña, esta puede afectar la calidad de la señal. Para remediar esto, se decidió basarse en reproducir una antena y un receptor con las medidas exactas a las de una de las fuentes consultadas. Los resultados parciales y satisfactorios se tienen en la señal mostrada en la figura 9.

Una vez que la situación de la pandemia de COVID mejore, se reanudarán las actividades del Grupo de Astronomía de la UACJ para concluir con la construcción del radio telescopio.

REFERENCIAS

- [1] Fredsti, S. (2019). *A brief history of Radio Astronomy*. [online] Astronomytoday.com. Available at: <http://www.astronomytoday.com/astronomy/radioastro2.html> [Accessed 12 Nov. 2019].
- [2] H.C. van de Hulst, *Radio Waves from space*, Nederlandsch Tijdschrift voor Natuurkunde 11, 201-221 (1945).
- [3] H.I. Ewen and E.M. Purcell, *Radiation from galactic hydrogen at 1420 Mc/s*, Nature 168, 356-357 (1951).
- [4] C.A. Muller and J.H. Oort, *The interstellar hydrogen line at 1420 Mc/sec and an estimate of galactic rotation*, Nature 168, 357 – 358 (1951).
- [5] F.J. Ken, *Early days in radio and radar astronomy in Australia*, in *The early years of radioastronomy*, edited by W.T. Sullivan 111 (Cambridge University Press, Cambridge, 1984), pp. 133 - 145.
- [6] W.T. Sullivan III, *Classics in Radioastronomy*, (D. Reidel, Dordrecht, 1982), pp 299 - 335. This book is a compilation, with commentary, of early radioastronomical papers. It includes refs. 3 - 5, and an English translation of ref. 2.
- [7] Griffiths, David J., *Introduction to Quantum Mechanics*, Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [8] For a demonstration of this statement: Wikipedia (2020). Perturbation theory (quantum mechanics). [Online]. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Perturbation_theory_\(quantum_mechanics\)#First_order_corrections](https://en.wikipedia.org/wiki/Perturbation_theory_(quantum_mechanics)#First_order_corrections) (Accessed 25 July, 2020)
- [9] Morgan, David. Experiments with Software Defined Radio Telescope. 2011.

ANEXOS

No se agregan anexos en este reporte técnico.

Productos generados

Este proyecto habrá de ser presentado en el Congreso Nacional de Física, en la modalidad de cartel, y da lugar a que se redacte un proyecto de titulación de licenciatura. Además, dado que el capítulo estudiantil de la UACJ de la Society of Physics Students tuvo el reconocimiento como capítulo estudiantil distinguido, se espera presentar el reporte y los resultados en la reunión correspondiente a llevarse a cabo en Estado Unidos en el 2021.