



DEPARTAMENTO DE  
**FÍSICA**

CIRAS  
● . . . . ● . . . .

# Construcción de radiotelescopio: Materia Oscura y rotación de la Vía Láctea



**Curso de Proyecto de Especialidad**  
**Licenciatura en Astrofísica con mención en Ciencia de Datos**  
Universidad de Santiago de Chile

Sebastián Pérez Márquez [Sebastian Perez Marquez](#)  
Cristóbal Espinoza <crisobal.espinoza.r@usach.cl>

Versión 2, Noviembre 2024

# Introducción

Este documento (en constante actualización) tiene como objetivo ser una guía sobre cómo construir un radiotelescopio sencillo para detectar la línea hidrógeno neutro de 21 cm y medir la curva de rotación de la Galaxia utilizando piezas fácilmente disponibles en una ferretería local y componentes electrónicos económicos. Esta guía está confeccionada pensando en el curso Proyecto de Especialidad de la Licenciatura en Astrofísica con mención en Ciencia de Datos de la Universidad de Santiago, dictado en el segundo semestre 2023 por los profesores Cristóbal Espinoza y Sebastián Pérez.

**Esta guía está ampliamente basada en la versión de Jonathan Williams de la Universidad de Hawaii (enero 2022) y en la documentación del programa Research Experiences for Teachers (RET) de la Universidad de West Virginia.**

La primera parte de esta guía describe la construcción de la bocina (o *horn*), el soporte y el hardware electrónico, mientras que la segunda mitad aborda el software utilizado para la adquisición y reducción de datos. Es importante destacar que estas observaciones de radio de onda larga se pueden llevar a cabo prácticamente desde cualquier lugar, ya sea que el cielo esté despejado o nublado, siempre y cuando no esté lloviendo.

Por favor, envíen un correo electrónico a los profesores si hay preguntas o comentarios sobre el proyecto.

- Cristóbal Espinoza <[cristobal.espinoza.r@usach.cl](mailto:cristobal.espinoza.r@usach.cl)>,
- Sebastián Pérez Márquez <[sebastian.perez.ma@usach.cl](mailto:sebastian.perez.ma@usach.cl)>
- Martina Bobadilla Baeza <[martina.bobadilla@usach.cl](mailto:martina.bobadilla@usach.cl)>

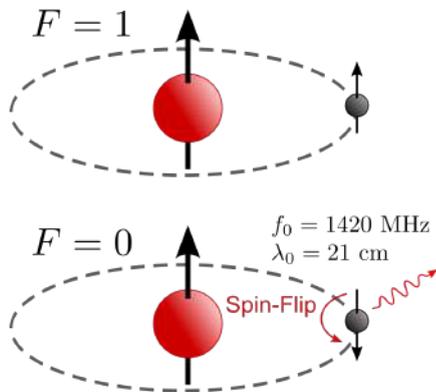
## Recursos importantes (más links a lo largo del documento)

- [Digital Signal Processing in Radio Astronomy](#) (DSPIRA) (en inglés). Diseño original con excelentes instrucciones disponibles en formato PDF o enlaces web.
- Proyecto de construcción del radiotelescopio por la Universidad de Hawaii.
- [Introducción a GNU Radio](#) (en inglés)

Drive del curso:  [Proyecto\\_de\\_Especialidad](#)

# Introducción y Contexto Astronómico

## Hidrógeno y su línea de 21 cm (1420.4 MHz)



El hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo (90% en número, 76% en masa) y la transición de inversión de espín de su único electrón produce la línea de 21 cm (Fig. 1). Esta es una línea de energía extremadamente baja ( $6 \mu\text{eV}$ ) y, por lo tanto, se excita fácilmente a través de colisiones en el gas. En consecuencia, dondequiera que haya hidrógeno neutro, que los astrónomos llaman HI (se pronuncia "H uno"), existe una línea espectral a 21 cm.

Figura 1. Diagrama de cuando el spin del electrón cambia de dirección, resultando en la emisión de un fotón de 21 cm de longitud de onda. Crédito de la figura: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen-line#/media/File:Hydrogen-SpinFlip.svg>

La frecuencia de la línea de hidrógeno (1420.4 MHz) se encuentra en la banda L (de 1 a 2 GHz, L es por "Long wave", y es una banda contigua a las bandas UHF y VHF asociadas a la radio FM y televisión), que está ubicada en la región de microondas del espectro electromagnético (ver Fig. 2).

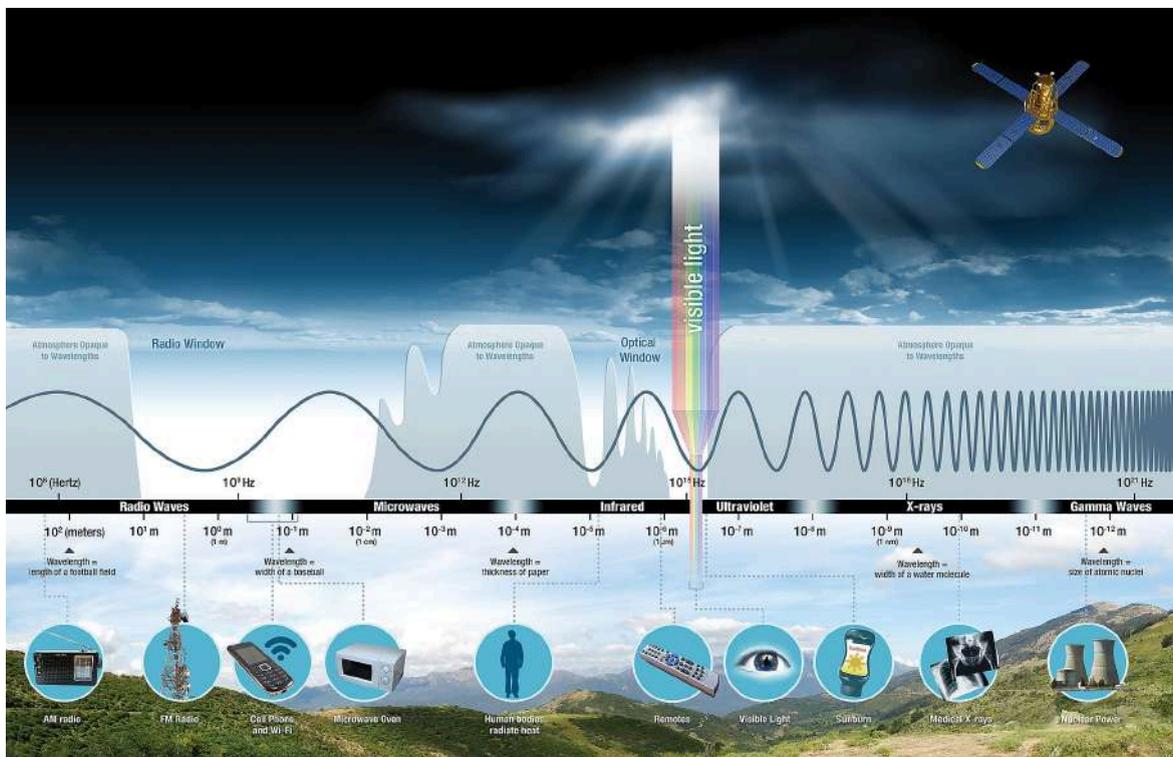


Figura 2. Espectro electromagnético con regiones donde la atmósfera es opaca a esa radiación. Crédito: NASA.

A este tipo de líneas se le llama *hiperfina* porque sucede entre dos subniveles del nivel energético base del hidrógeno neutro. Esta transición es altamente *prohibida*, con una tasa de transición extremadamente pequeña de  $3 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ , y una vida promedio del estado excitado de alrededor de 11 millones de años. Las colisiones de átomos de hidrógeno neutro con electrones u otros átomos pueden promover la emisión de fotones de 21 cm. Es poco probable que ocurra espontáneamente esta transición en un laboratorio en la Tierra. Comúnmente se observa en entornos astronómicos, como nubes de hidrógeno en nuestra galaxia y otras. Debido al principio de incertidumbre, su larga vida útil le otorga a la línea un ancho natural extremadamente pequeño, por lo que la mayoría del ensanchamiento se debe a desplazamientos Doppler causados por el movimiento en masa o la temperatura no nula de las regiones emisoras.

La intensidad de la emisión de la línea está directamente relacionada con el número de átomos de hidrógeno a lo largo de nuestra línea de visión, a la que llamamos "haz" del telescopio. La frecuencia de reposo de la línea HI se conoce con una precisión extremadamente alta a partir de cálculos de mecánica cuántica (que se prueban con una serie de mediciones de laboratorio y se verifican mediante observaciones directas). Nuestro telescopio medirá el perfil espectral a medida que se desplace y ensanche en frecuencia debido al efecto *Doppler*. A partir de nuestras mediciones de la diferencia entre la frecuencia observada y la frecuencia de reposo, podemos determinar los movimientos del gas. Luego, al mapear estos movimientos a lo largo del plano de la Galaxia, podemos medir la rotación del gas.

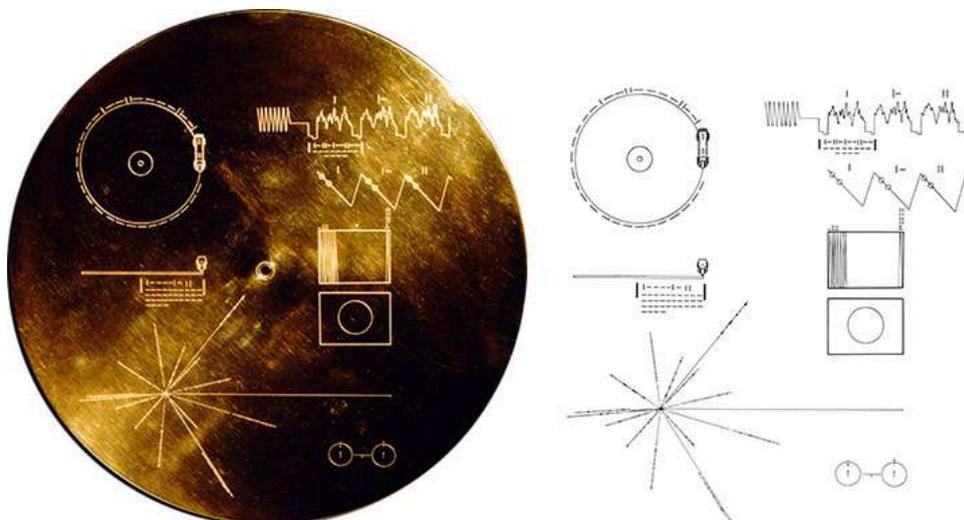


Figura 3. La placa "Pioneer", o el "Golden record", que acompaña a la sonda Pioneer/Voyager en su viaje fuera del Sistema Solar. El esquema de la derecha abajo muestra la transición de spins del hidrógeno, utilizando como referencia universal para poder decodificar el resto del mensaje.

La placa Pioneer, adjunta a las sondas Pioneer 10 y Pioneer 11, retrata la transición hiperfina del hidrógeno neutro y utiliza la longitud de onda como una escala estándar de medida (Fig. 3). Por ejemplo, en este mapa, se representa la posición del Sol en relación con 14 púlsares cuyo período de rotación alrededor de 1977 se da como un múltiplo de la frecuencia de la transición de inversión de espín del hidrógeno. Los creadores de la placa teorizaron que una civilización avanzada podría usar las ubicaciones de estos púlsares para localizar el Sistema

Solar en el momento en que se lanzaron las sondas. Debido a sus propiedades fundamentales, esta línea es de interés en la búsqueda de inteligencia extraterrestre. La línea de hidrógeno de 21 cm se considera una frecuencia favorable en el programa SETI en su búsqueda de señales de posibles civilizaciones extraterrestres.

Las observaciones de la línea de hidrógeno se han utilizado para revelar la forma espiral de la Vía Láctea, y para calcular la masa y la dinámica de galaxias individuales. En particular, a nosotros nos interesa el poder determinar cómo se mueve el gas (su *cinemática*) en nuestra Galaxia, la vía láctea, lo que estaría enmarcado en el estudio de *curvas de rotación galácticas*.



Figura. Presentación de estudiantes sobre la línea de 21 cm (Primavera 2023).

# Curvas de rotación de galaxias

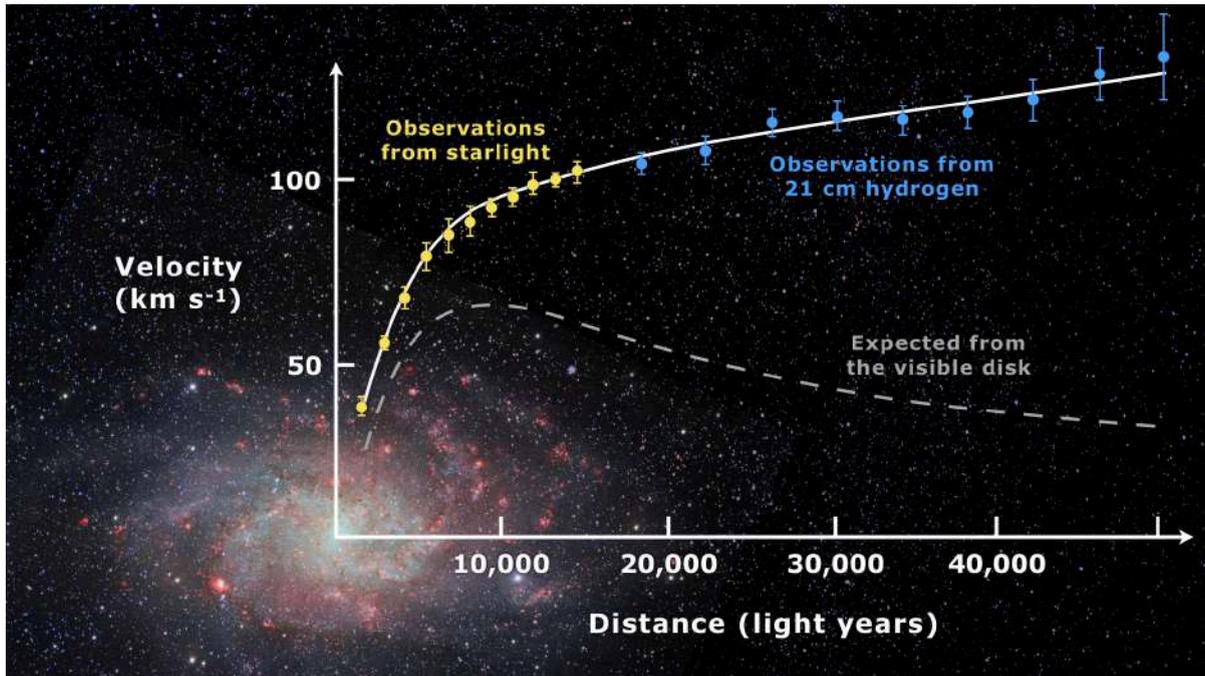


Figura 4. Los puntos amarillos y azules muestran la curva de rotación medida de la galaxia espiral M33, mientras que la línea gris muestra una predicción basada en la distribución de la materia visible (Corbelli y Salucci 2000). La discrepancia entre las dos curvas se puede explicar agregando un halo de materia oscura que rodea la galaxia.



Figura. Presentación de estudiantes sobre la curva de rotación de la Galaxia (Primavera 2023).

## Software defined radio (SDR)

A la baja energía de la línea de 21 cm, la radiación electromagnética se comporta más como una onda que como un fotón y se puede detectar a través de la corriente oscilante que crea en una antena (en lugar de inducir electrones a saltar a través de una barrera como en los detectores CCD para luz óptica o infrarroja). Una radio incluye varios componentes, que son: un amplificador para aumentar la intensidad de la señal; un filtro para seleccionar un rango estrecho de frecuencias; un mezclador para combinar la señal entrante con una entrada del usuario; y un demodulador para convertir la señal en un contenido definido por el usuario, como un altavoz que produce ondas sonoras para una radio tradicional o una señal digital en nuestro caso. Los diversos pasos pueden realizarse mediante circuitos eléctricos dedicados (resistencias, condensadores, diodos...), pero también pueden llevarse a cabo mediante software, es decir, operaciones matemáticas en una señal digitalizada. Este proyecto de radiotelescopio es posible principalmente por la llegada y el cada vez menor costo de los componentes llamados *software defined radio* o SDR. Existen muchos recursos en línea para aprender sobre SDR y ver sus numerosas aplicaciones, por ejemplo:

- [Software-defined radio - Wikipedia](#)
- [About RTL-SDR](#)



Figura. Dispositivo (dongle) SDR que permite digitalizar la señal recibida por nuestro radiotelescopio.

Para más información sobre la historia, funcionamiento y aplicabilidad de SDR a la radioastronomía, revisar la clase del Prof. Cristóbal Espinoza en el siguiente link:

 [clase-03\\_SRDs.pdf](#)

## Construyendo nuestro radiotelescopio



Figura: versión final de nuestro radiotelescopio (a reemplazar por nuestra propia fotografía al final del curso).

## Paso 1. Construyendo el soporte para el cuerno

El soporte se adhiere al cuerno, proporciona un marco alrededor de la guía de ondas y un brazo que mueve el cuerno en elevación. Seguimos las indicaciones del equipo de Hawaii que usan listones de madera cepillada de 2"x1" (en lugar de su sugerida 2"x2" por [DSPIRA](#)) para reducir el peso.



Figura. El soporte del cuerno que también va adherido a la base del radiotelescopio. Este modelo es el mismo que propone DSPIRA pero con madera un poco más delgada para disminuir el peso del instrumento. El contenedor de metal que se ve a la derecha corresponde a la guía de ondas (*waveguide*). El dispositivo electrónico que se ve adherido a la lata y el soporte corresponde al amplificador de la señal (LNA, ver abajo). Estas imágenes serán reemplazadas por nuestras propias imágenes al final del curso

### Materiales necesarios

- Dos piezas de 2"x1" de 20" (50.8 cm) de largo.
- Dos piezas de 2"x1" de 9 5/8" (24.45 cm) de largo.
- Una pieza de 2"x1" de 6 11/16" (17 cm) de largo.
- Alternativamente se pueden usar 3 piezas de 6 11/16" (17 cm) de largo para ensamblar por dentro (como en la Figura arriba).
- Tres piezas de 2"x1" de 9" (22.86 cm) de largo.

Nota: Estas ocho piezas de 2"x1" se pueden cortar de una sola pieza de 3.2m de largo.

- Una pieza de madera enchapada de 1/4" de grosor, de 7" x 8" (17.78 cm x 20.32 cm).
- Tornillos de construcción de 2 1/2" para ensamblar las piezas de 2x1: necesitarás aproximadamente 10 de estos.
- Tornillos de construcción de 1" o 1 1/4" para sujetar la plancha de madera enchapada de 7"x8" al soporte.
- Dos pernos largos de 3 1/2" - para sujetar el soporte a la base.
- Dos tuercas mariposa - para asegurar los pernos en su lugar.

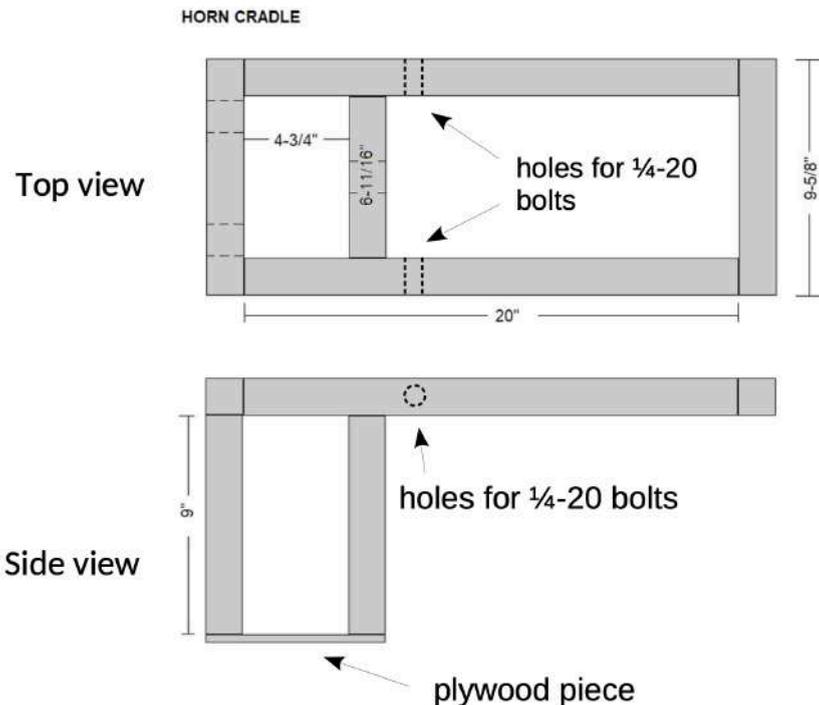


Figura. Diagrama de ensamblaje. Notar que en nuestra versión las maderas son de 2x1" en vez de las de 2x2" usadas aquí. Notar también que los agujeros deben ser perforados con una broca lo suficientemente ancha para los pernos con los que disponemos.

## Ensamblaje del soporte

Es importante que en esta etapa sean cuidadosos/as para evitar accidentes. Utilizar guantes para hacer cortes o perforaciones, y seguir las precauciones del/los profesores.

1. Cortar las maderas de acuerdo a las especificaciones. Lijar impurezas de corte si es necesario.
2. Utilizando los tornillos de 2 1/2", ensambla las piezas de 20", 6 11/16" y 9 5/8" en un rectángulo con una barra transversal, como se ilustra en el diagrama de vista superior.
3. Adjunta las dos piezas de 9" que se extienden hacia abajo desde las esquinas en el extremo izquierdo del marco rectangular y una pieza de 9" desde el punto medio de la barra transversal de 6 11/16".

4. Utiliza los tornillos de construcción para sujetar la pieza de madera enchapada de 1/4" en la parte inferior de estas tres extensiones. Esto debería formar una estructura en la que la lata (receptor) pueda encajar.
5. Perforar agujeros para los pernos que se utilizarán para conectar la estructura al soporte.
6. Uno de los propósitos de la pieza de madera contrachapada es proporcionar soporte al cable que se conecta al amplificador de bajo ruido (LNA, por sus siglas en inglés). Se recomienda que, después de ensamblar el cuerno, se coloque un LNA en la lata para determinar dónde perforar un agujero (o una ranura) en la madera contrachapada. Esto es cuestión de preferencia personal y ayudará a asegurar un montaje adecuado del cable y el LNA.

## Paso 2. Construyendo la montura o base

### Materiales necesarios

- Dos piezas de madera de 2x4" de 3 pies (91.44 cm) de largo.
- Dos piezas de madera de 2x4" de 3 pies 3 3/8 pulgadas (100 cm) de largo.
- Dos piezas de madera de 2x4" de 2 pies (60.96 cm) de largo.
- Dos piezas de madera de 2x4" de 1 pies 11 5/8 pulgadas (60 cm) de largo con un corte de 45 grados en un extremo para un soporte.
- Tornillos de construcción de 2 1/2" - para ensamblar la base del soporte.
- Pernos de 3 1/2" de largo y tuercas mariposa - para conectar el soporte con la estructura.
- Golillas.

### Ensamblaje del soporte de la base:

Las piezas inferiores de la base consisten en palos de 2x4 ensamblados de alguna de las dos formas que muestra la figura abajo. Esta configuración permite que las piezas de la base se ajusten bien y entreguen un buen soporte. El ensamblaje de la izquierda, como en una cabaña de troncos, además facilita el ensamblaje y desmontaje.

La lista de materiales anterior, corresponde al ensamblaje de la imagen de la derecha.



Figura. Dos ejemplos de base para el radiotelescopio. 1

Si se elige el modelo de la izquierda, seguir [las instrucciones DSPIRA al pie de la letra](#). En caso contrario, el modelo de la derecha es más simple y se puede improvisar siguiendo la imagen.

**Importante:** Al ensamblar la base asegurarse de que el ancho sea consistente con el ancho del soporte para el cuerno que armamos en la sección anterior.

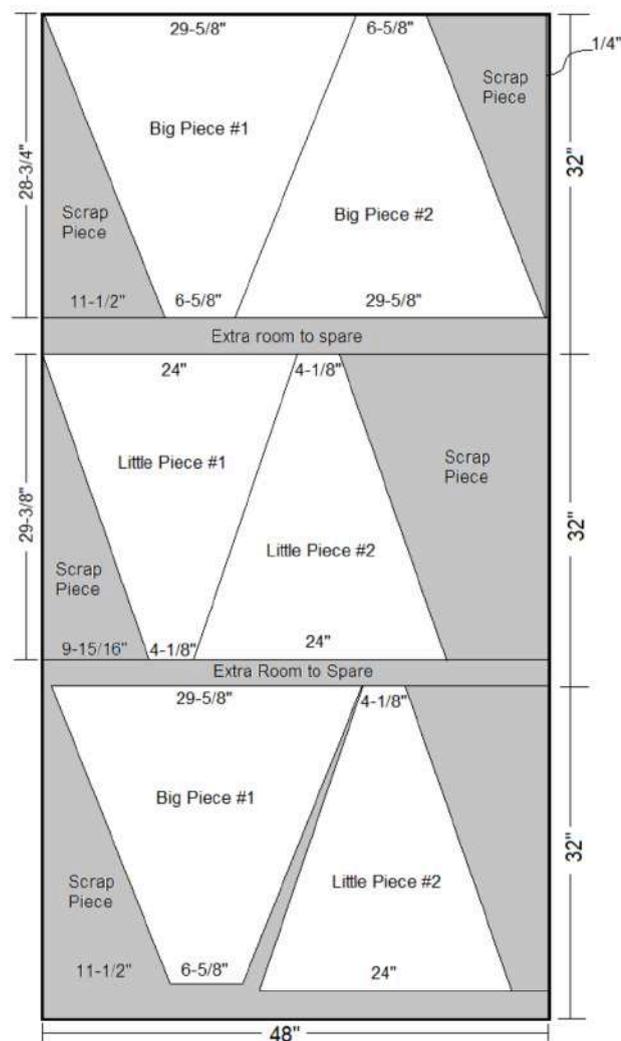
El soporte y el cuerno se conectan a la base a través del eje de elevación, que consta de dos tornillos largos con tuercas mariposa. Es importante asegurarse de que haya una buena alineación antes de perforar. **Agregar arandelas autorroscantes** ayuda a mantener el telescopio apuntando en una dirección específica y facilita su movimiento al cambiar a una nueva posición en el cielo.



Figura XX. Conexión entre el soporte del cuerno y la base. Notar que el uso de arandelas autorroscantes ayuda a mantener el telescopio apuntando hacia la dirección deseada.

## Paso 3. Construyendo el cuerno

El cuerno es la pieza clave que recoge la radiación electromagnética que viene del cielo. Para su construcción seguiremos de cerca [las instrucciones de DSPIRA](#).



El cuerno se construye a partir de tablero de aislamiento para el hogar, hecho de espuma rígida pero ligera. Un solo tablero de 4'x8' (121.92cm x 243.84cm) es suficiente para construir 1 cuerno (de hecho, 1.5, por lo que 2 tableros hacen 3 cuernos si tienes una gran clase). Se puede cortar el lado largo del tablero en 3 piezas de igual tamaño (32" - 81.28cm) para poder transportarlos a la clase. Una vez transportados, se cortan las cuatro caras trapezoidales del cuerno siguiendo la plantilla de DSPIRA (ver figura).

El corte se puede hacer con un cuchillo de uso general guiado por una pieza recta de madera que se utiliza para el siguiente paso. Mide dos veces, corta una vez.

**Nota.** En nuestro caso probamos con cartón piedra rígido en vez de espuma aislante. Al parecer funciona bien y es más fácil de conseguir.

Figura XX. Diagrama de corte para el cuerno. Notar que se necesitan 3 paneles de 32"x48" para construir 2 cuernos.

Si puedes encontrar un tablero que tenga un lado aluminizado, ahorrarás un paso. En nuestro caso, no estaban disponibles, por lo que pegaremos papel de aluminio de cocina con pegamento en aerosol en cada pieza<sup>1</sup>. (Ten cuidado de que algunos adhesivos pueden "comerse" la espuma, así que rocía muy ligeramente). Utiliza cinta adhesiva de aluminio para rodear todos los bordes de cada pieza individualmente y luego para unirlas en una forma de pirámide que forme el cuerno.

¿Qué tan precisas deben ser las piezas y qué tan suave debe estar el papel de aluminio y la cinta adhesiva? Esto es una oportunidad para pensar en la escala natural del telescopio en

<sup>1</sup> La cola fría de madera, incluso la de uso escolar, cumplen bien la función.

relación con la longitud de onda de la observación. En nuestro caso, incluso errores de 1 cm son una pequeña fracción de la longitud de onda de funcionamiento de 21 cm, por lo que no necesitamos una alta precisión en nuestra construcción y ciertamente el papel de aluminio no necesita ser tan suave como para ver nuestro reflejo en él.



Figura. Proceso de aluminizado.

Invitamos a las y los estudiantes más motivados a estudiar la derivación de la ecuación de Ruze, que muestra que la eficiencia de la apertura disminuye al 50% cuando los errores de superficie son  $\lambda/16$ , por ejemplo, en la Sección 3.34 del libro "NRAO Essential Radio Astronomy" que puedes encontrar en el siguiente enlace:

<https://science.nrao.edu/opportunities/courses/era>

El cuerno o megáfono no mantendrá su apertura rectangular sin un soporte adicional. También tiende a golpearse bastante al moverse dentro y fuera de las aulas, por lo que agregamos un marco de madera en la parte inferior que también proporcionó una forma de sujetarlo al soporte y alivió el estrés en la guía de ondas. Un equipo también agregó soporte estructural al otro extremo del cuerno, aunque resultó que esto no era tan crítico.



Figura. Cortar en el extremo del cuerno y adjuntar un collar de madera mediante pegamento especial. Esto proporciona soporte estructural y un punto de sujeción para el soporte, aliviando así el estrés en la guía de ondas.

## **Paso 4. Construyendo la guía de ondas y la antena**

La guía de ondas, como su nombre indica, guía la radiación que se recoge en el cuerno hacia la antena, donde crea una corriente eléctrica que puede ser detectada. Una guía de ondas es básicamente un tubo eléctricamente conductor (es decir, de metal) que canaliza las ondas en una sola dirección. Siguiendo el tema de utilizar componentes disponibles en tiendas para nuestro telescopio, usamos una lata rectangular (de estilo "F") que generalmente se utiliza para almacenar aceite de automóvil o diluyente de pintura. En nuestro caso, fuimos a un taller mecánico y nos regalaron varias latas de aceite de motor.

Puedes comprar una lata de este tipo pero luego debes vaciar y almacenar adecuadamente o desechar correctamente el contenido. En el caso del aceite de motor, se recomienda no usar agua, sino un poco de bicarbonato de sodio para absorber los residuos de aceite y luego remover con un paño o toalla de papel.

Retira un extremo usando un abrelatas de borde liso. El extremo plano es el más fácil de retirar, pero luego deberás usar papel de aluminio para cubrir el agujero de vertido en el otro

extremo (como se indica en las instrucciones de DSPIRA). Se puede usar alicates para quitar la manija de aluminio y luego retirar ese mismo lado con el agujero de vertido para obtener un aspecto más limpio.

La antena es simplemente un trozo recto de alambre de cobre soldado a un conector coaxial SMA que se conecta a la lata. La lata actúa como un plano de tierra y, por lo tanto, el alambre de cobre tiene una longitud de un cuarto de longitud de onda =  $5.25 \text{ cm}^2$ . También se coloca a esa misma distancia,  $\lambda/4$ , desde el extremo cerrado de la lata en el lado ancho.

Una manera de simplificar esta parte del proyecto es utilizando un alambre más delgado, calibre 10, en lugar del grueso calibre 4 sugerido por DSPIRA, y usar un conector coaxial que se puede sujetar a la lata mediante una tuerca en lugar de soldar.

En nuestro caso, para adherir el conector SMA con el alambre de cobre a la lata, es necesario utilizar un pegamento especial. En esta ocasión utilizamos Poxilina, la cual necesita un tiempo de secado de 10 min mínimo, y 1 hora para una manipulación más agresiva.



Figura XX. Soldando el cable de cobre al conector coaxial. **Luego, cortando el cable para que quede exactamente con  $\lambda/4$  de largo. Nota: considerar el grosor de la guía de ondas.**

---

<sup>2</sup> Se recomienda realizar el cálculo de  $\lambda/4$  y procurar la mayor precisión posible



Figura XX. (Izquierda) Perforar el agujero para el conector que se conectará a la lata. El agujero se encuentra en el centro del lado ancho de la lata y a una distancia de  $\lambda/4$  desde el extremo cerrado. (Derecha) Así se debería ver la antena al mirar dentro de la guía de ondas. Notar que la longitud del cable que se asoma debe ser exactamente igual a  $\lambda/4$ .



Figura XX. Mirando a la antena a través del megáfono.

Finalmente, la lata/guía de ondas se adjunta, tanto estructural como eléctricamente, al cuerno. Las dimensiones del cuerno deben ser de manera que la lata encaje perfectamente y luego se cubre simplemente con papel de aluminio desde el interior. **La lata no debe invadir el cuerno y todos los bordes de las cuatro caras del cuerno-lata deben estar cubiertos de forma segura, sin dejar agujeros.**

(Tomar en cuenta que nuevamente nos desviamos de DSPIRA aquí al adjuntar el soporte al collar de madera alrededor del cuerno, evitamos tensiones mecánicas en la interfaz guía de ondas-cuerno; consulta la sección anterior para obtener un detalle fotográfico).

## Paso 5: Conectando la electrónica

Ahora que el telescopio ha sido construido, es hora de conectar la electrónica y comenzar a detectar ondas de radio. Los ingenieros eléctricos pueden optar por construir su propio amplificador de bajo ruido (LNA), para lo cual hay diseños en el sitio web de DSPIRA. Nosotros tomamos el camino más fácil y simplemente compramos uno específicamente para la línea HI (por ejemplo, [nooelec](#)).

Hay varias versiones de LNA, algunos vienen en una carcasa, que sin duda es más fácil de manejar, pero hay versiones sin carcasa llamadas "barebones". Esta es ligeramente más barata, pero hay que chequear que no haya problemas con la electricidad estática u otros problemas que afectan estos componentes. El LNA se alimenta mediante una batería portátil a través de un puerto micro-USB de 5V. El amplificador se conecta a la antena en la guía de ondas a través de un cable coaxial SMA corto y la salida se dirige al SDR conectado a la computadora.

La batería y el amplificador se fijan en el extremo del soporte del cuerno. Se puede utilizar un tablero perforado para sostenerlos o, simplemente los adjuntamos a las vigas del soporte y al respaldo. Estas conexiones se pueden considerar permanentes, ya que la batería solo necesita cargarse ocasionalmente y se puede hacer in situ cuando no se está observando. Sin embargo, para quitar el cuerno para guardarlo, simplemente desenrosca la conexión entre la antena y el LNA. Sorprendentemente, el SDR airspy alimenta el LNA a través del cable coaxial (además de recibir la señal), por lo que no necesitas una batería.



Asegúrate de que la antena esté conectada a la entrada del amplificador. Es el mismo lado por donde entra la alimentación. Es fácil cometer errores en esto, y puede llevar a problemas como que no se vea inicialmente la línea HI.

Nota: puede ser difícil el fijar la lata/antena a la entrada del amplificador ya que puede que los componentes no permitan soldar directamente.

## Paso 6: El software de medición

El radiotelescopio que se ha construido usa una SDR para pre procesar la señal y digitalizarla. La señal es analizada en el computador por un software que actuará de espectrómetro.

Este es el gitHub del software: [https://github.com/WVURAIL/gr-radio\\_astro](https://github.com/WVURAIL/gr-radio_astro), en donde también encontrarán instrucciones para instalarlo. Esto requiere ciertas habilidades y mucha paciencia, ya que lo más probable es que no funcione directamente sino que haya lidiar con aspectos particulares del computador que se está usando.

Otra posibilidad es inicializar un laptop desde un pendrive que tenga Ubuntu, con GNU Radio y el espectrómetro ya instalados. Se requiere un pendrive con al menos 32 GB de capacidad. Todo lo que haya dentro se perderá.

Instrucciones para preparar el pendrive (en inglés):

[https://wvurail.org/dspira-lessons/Install\\_Ubuntu\\_spectrometer\\_onFlashdrive](https://wvurail.org/dspira-lessons/Install_Ubuntu_spectrometer_onFlashdrive)

Luego, es necesario configurar el laptop de manera que inicialice (boot) desde el pendrive. Eso normalmente se hace en la BIOS del computador.

### spectrometer\_w\_cal.grc

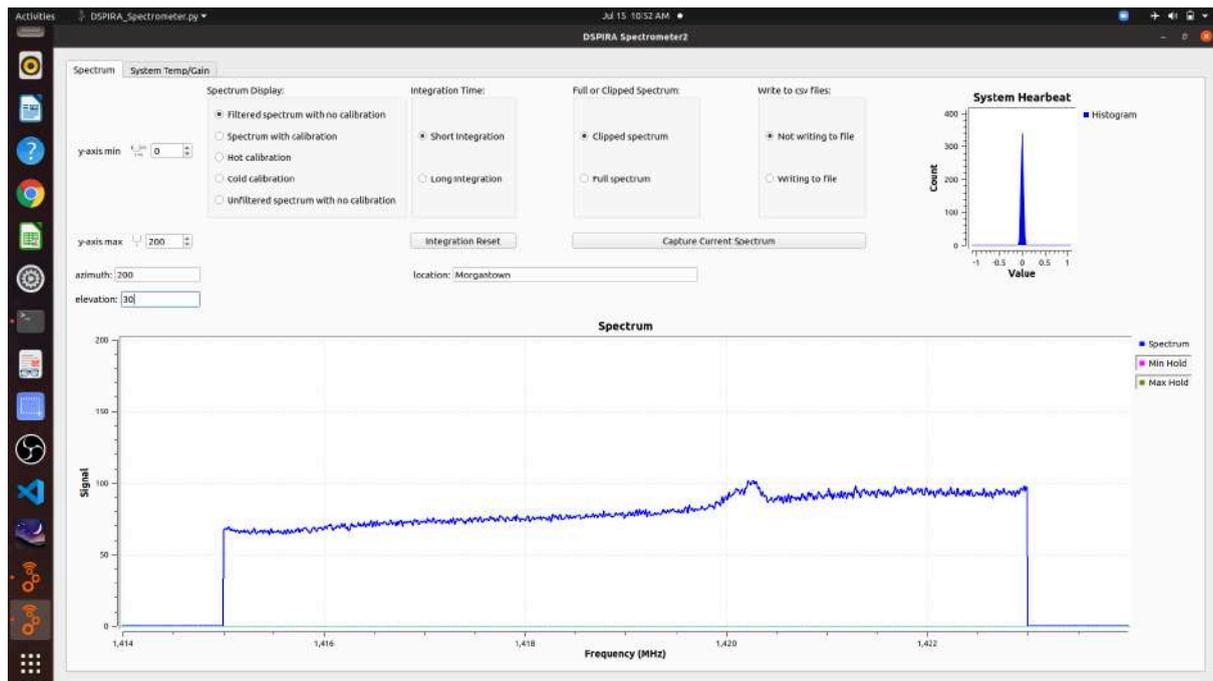
Este es el espectrómetro que se usará para hacer las mediciones. Entre otras cosas, puede generar archivos \*.csv con espectros tomados durante un cierto tiempo de integración.

El programa está hecho en GNU Radio y se puede correr desde gnuradio-companion, que es la interfaz gráfica de las librerías GNU Radio.

Antes de ejecutar el programa, es necesario definir correctamente algunas variables, que están en la parte superior izquierda del flowgraph. La variable llamada "prefix" debe ser el *path* a la carpeta en donde se desea guardar los archivos con los datos medidos. Otras variables que posiblemente deban ser cambiadas son los tiempos de integración *integration\_time1* e *integration\_time2*, que establecen cuánto dura una integración corta (short) y una larga (long), respectivamente.

Al correr el programa se abre una ventana que muestra un espectro obtenido luego de integrar durante un tiempo de integración. Hay dos tiempos posibles de integración, short y long, y sus valores están controlados por las variables descritas más arriba.

Con el botón "Capture current spectrum" se guarda un archivo \*.csv con el espectro actual, obtenido durante una integración (short o long). Si se activa "Writing to file", el programa guarda un archivo cada vez que se cumple un ciclo de integración. Es decir, si es una short integration de 10 s, se crea un archivo (un espectro) cada 10 s. Esto no se detendrá hasta que se desactive esta opción.



*El espectrómetro spectrometer\_w\_cal.grc*

## Troubleshooting:

A veces el software no logra compilar fácilmente (depende de muchas dependencias y cada una de esas dependencias es distinta para distintos sistemas operativos). Algunas cosas que podrían resolver el problema de compilación (pasos cmake y make):

- Instalar (utilizando `apt-get` en linux, `brew` o `port` en macOS)
  - `yaml-cpp` (por ejemplo: `brew install yaml-cpp`)
  - `doxygen`
  - `pybind11`
  - `gr-osmosdr` (esto quizás necesita un poco más de trabajo)

En computadores con Linux Mint instalado, el programa funciona perfectamente si uno sigue las instrucciones en el gitHub del software: [https://github.com/WVURAIL/gr-radio\\_astro](https://github.com/WVURAIL/gr-radio_astro).

En computadores Mac, la instalación requiere conectar algunas librerías a mano. Por ejemplo, en un macOS 11.7.2 (Big Sur) fue necesario crear un soft link en los directorios de radioconda apuntando a un directorio de python del sistema:

```
cd radioconda/lib/python3.10/site-packages/gnuradio
ln -s /usr/local/lib/python3.10/site-packages/gnuradio/radio_astro .
```

# Paso 7: Primera luz / First light

En este momento ya tenemos la antena lista, la electrónica conectada y el software instalado en un computador: podemos salir a tomar nuestra primera observación.

Para más detalles sobre la primera luz y las mediciones con la antena ver clase del Prof. Sebastián Pérez [Clase-06-mediciones.pdf](#)

Equipamiento necesario para la observación:

1. La antena completa
2. Un amplificador de señal (a menos que ya venga incluido en la SDR)
3. Una SDR (Airsipy, STL-SDR, o similar) con un cable USB conectado a un computador
4. Un computador con el software necesario (GNURadio) siguiendo las instrucciones de más arriba.

## ¿Dónde estoy apuntando?

El montaje del telescopio es un sistema altazimutal que necesitamos convertir a coordenadas celestes, ya sea ecuatoriales ( $\alpha, \delta$ ) o, dado que planeamos mapear la Vía Láctea, galácticas ( $l, b$ ). Esto requiere conocimiento del tiempo y la ubicación en la Tierra en el momento de la observación y una oportunidad para que la clase reflexione o revise los sistemas de coordenadas.

Dado que utilizamos Python para reducir y analizar los datos, también lo usamos para la conversión de coordenadas utilizando el paquete `astropy`. Las y los usuarios deben conocer Python o aprenderlo de otras fuentes (abundantes). Para convertir de altazimutal a galácticas ( $l, b$ ), escriba en un prompt de Python, ya sea en la línea de comandos o, como se muestra [en este cuaderno Jupyter](#).

## Calibración

Seguir las [instrucciones DSPIRA](#) para calibración, es decir:

1. Realizar una observación de “cold calibration” (escoger esta opción en *Spectrum Display*) apuntando a una región del cielo sin señal, es decir en donde no se detecte la línea de 21 cm. Verificar en el gráfico que no se vea la línea. Una vez esto pase, cambiar a *long integration* y esperar a que el gráfico se estabilice.
2. Sin mover el telescopio aún, escoger ahora la opción “hot calibration” y cambiar al modo *short integration*. Esperar a que el gráfico se actualice y apuntar la antena al suelo. Una vez que el gráfico se actualice, cambiar a *long integration*.

3. Notar que al pasar desde “cold” a “hot” calibration, se guardan los espectros en memoria. Luego, el software automáticamente corregirá la señal para obtener una observación más limpia de la línea de 21 cm.
4. Escoger ahora la opción *Spectrum with Calibration* y esperar a que cambie el espectro. Una vez suceda, apuntar el telescopio a alguna región de interés.
5. Repetir cuantas veces sea necesario. Es posible que las primeras calibraciones entreguen señal “negativa”. Esto es debido a que el sistema está todavía en proceso de calentamiento (chequear “System Temperature” en el software).

## Primera observación real

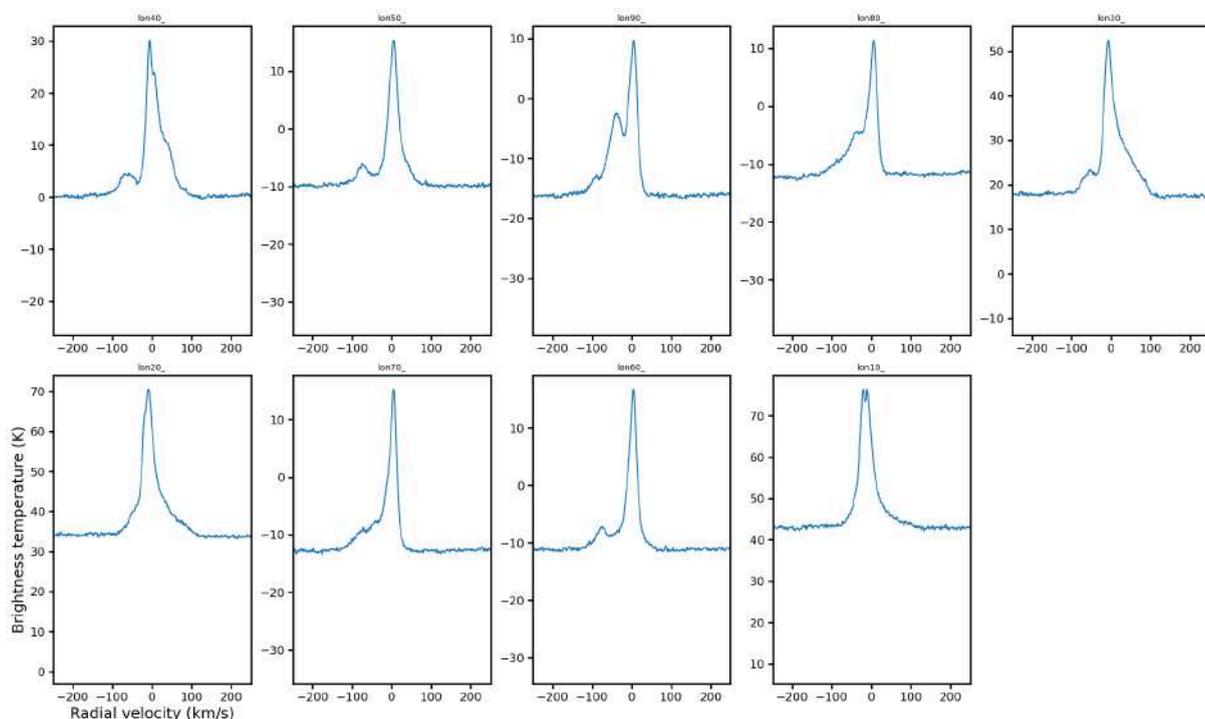
Luego de que celebramos la “First Light” y que averiguamos cómo apuntar el telescopio, estamos listos para observar y recolectar datos. Primero tomar en cuenta que el principio fundamental de una campaña de observación es preocuparse de que la observación debe ser replicable. Por esto es importante tener un “log” de observación, que en nuestro caso pudiese ir en el informe.

# Paso 8: Jupyter notebooks para reducción de datos

Datos de ejemplo de observación [aquí](#).

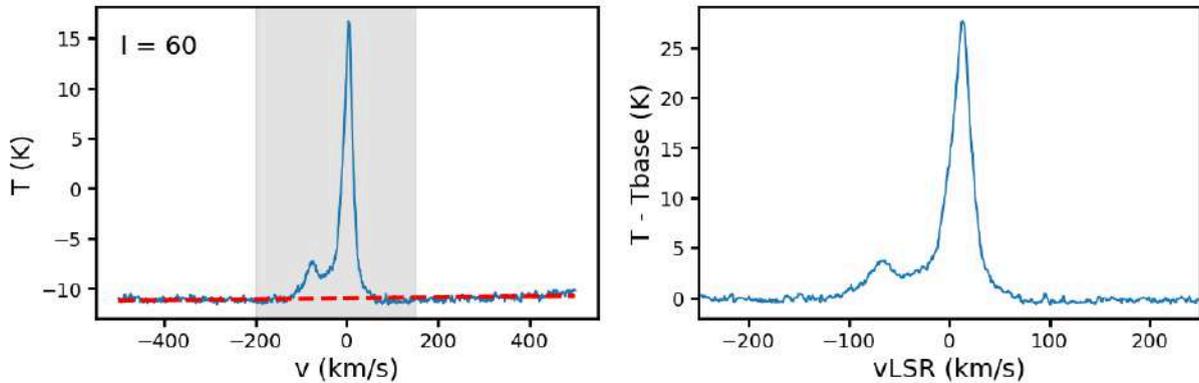
Los siguientes Jupyter notebooks se pueden encontrar en [esta carpeta](#) y nos guiarán por todo el proceso de calibración y reducción de datos. Estas son adaptaciones basadas en los notebooks del profesor Jonathan Williams de la Universidad de Hawaii:

1. hot\_cold.ipynb: realiza una buena calibración de los datos caracterizando las observaciones “hot” y “cold” y seleccionando las porciones del espectro ideales para calibrar.
2. inspect.ipynb: Recorre cada uno de los directorios y grafica los espectros individuales en un solo panel para identificar cualquier valor atípico (nos permite ver si hay algún espectro de mala calidad que sea necesario eliminar o re-observar).
3. calibrate.ipynb: Calibra los espectros de (frecuencia, cuentas) a (velocidad, temperatura) y los guarda en el directorio "calibrated\_spectra".  
Luego de aplicar “calibrate” deberemos tener espectros (temperatura vs velocidad) como estos:



4. baseline.ipynb: Incluso después de la calibración, la señal lejos de la línea de HI puede estar desplazada de cero. Esto se debe principalmente a que las observaciones de diferentes ubicaciones galácticas se realizan a diferentes elevaciones y, por lo tanto, con diferentes trayectorias a través de la atmósfera. Las elevaciones más bajas verán una mayor emisión atmosférica y, en consecuencia,

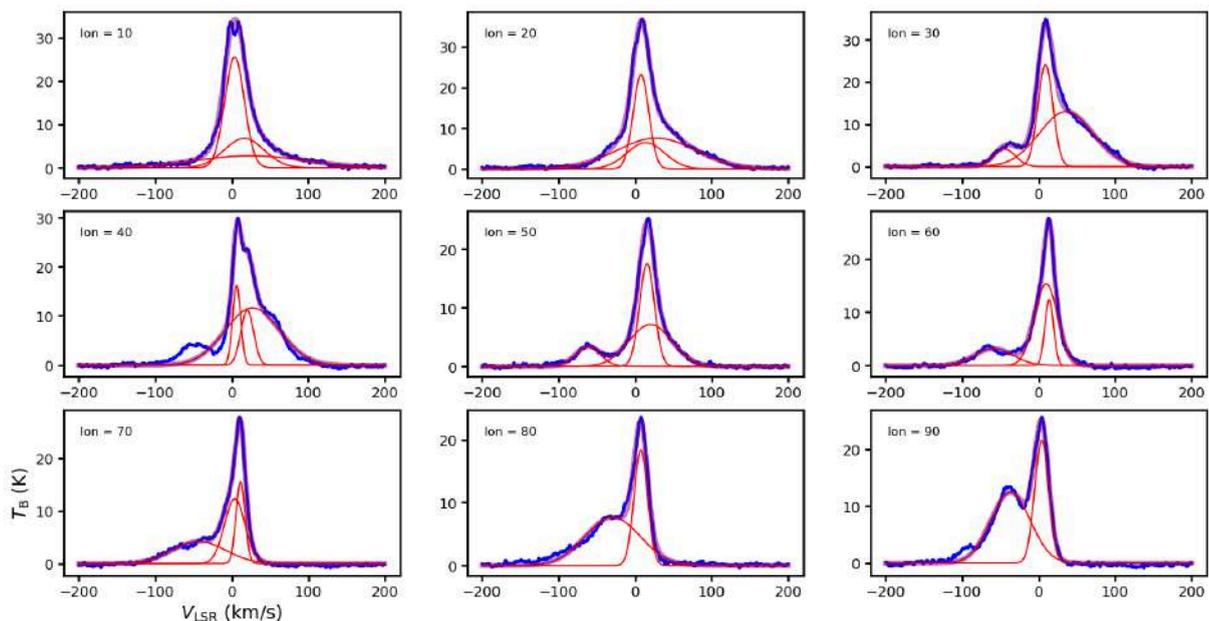
una mayor potencia en todas las frecuencias. Para eliminar este efecto, ajustaremos una línea de base a los espectros calibrados y la restaremos de los datos. Luego, aplicaremos la **corrección de velocidad bariocéntrica**. Al final tendremos espectros como estos (antes de corrección y después):



5. `rotation_curve.ipynb`: descompone cada línea de 21 cm en distintos componentes y los representa (ajusta) con funciones gaussianas. Luego calcula la velocidad de un componente representativo. Este código usa “gausspy” para ajustar las funciones gaussianas. Para instalar gausspy, pueden bajarlo de [este enlace](#). Para instalar, descomprimir la carpeta, entrar a `gausspy-master/` y correr en un terminal

```
python setup.py install
```

(básicamente, gausspy es incompatible con versiones numpy >1.2. La versión en el drive arregla ese problema)



El código luego toma el componente representativo de cada espectro y plotea la velocidad versus la distancia en kpc desde el centro galáctico. El resultado es una curva de rotación como esta:

