

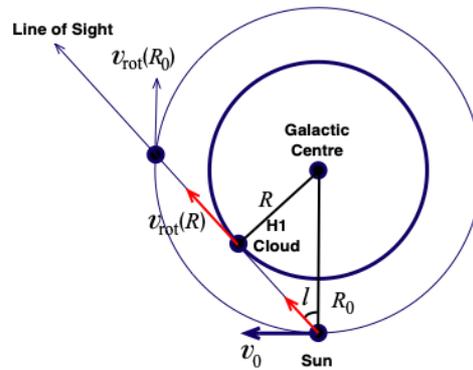
### Descubriendo la materia oscura galáctica usando un radiotelescopio

El Universo consiste en una gran cantidad de materia oscura. Descubrirás la materia oscura en nuestra Galaxia midiendo la velocidad de rotación tangencial del gas en el disco de nuestra Galaxia. El gas en el disco de la galaxia Vía Láctea contiene hidrógeno atómico neutro (HI) que puede ser detectado usando su transición de inversión de espín, correspondiente a una frecuencia de reposo de  $f_0 = 1420.40575$  MHz. La velocidad de rotación del gas en la Galaxia puede ser medida usando el desplazamiento Doppler de esta transición.

Tu tarea es medir los espectros de emisión de radio entre 1419.0 MHz y 1421.0 MHz emitidos por el gas en el disco Galáctico en diferentes longitudes en el plano Galáctico usando un radiotelescopio proporcionado a ti. Analizarás estos datos para medir la curva de rotación de la galaxia Vía Láctea. Basado en las velocidades de rotación medidas, estimarás la masa encerrada dentro de diferentes distancias Galactocéntricas, las compararás con la masa bariónica conocida en la Galaxia dentro de los radios correspondientes y atribuirás cualquier diferencia a la materia oscura.

#### Antecedentes teóricos

Suponga que todo el gas en la Galaxia se mueve en sentido horario (visto desde el Polo Galáctico Norte) en órbitas circulares a diferentes distancias del Centro Galáctico, como se muestra en la figura a continuación. Considere el gas que se mueve con una velocidad de rotación ( $v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$ ) en la posición del Sol. El marco de referencia que rota a esta velocidad se llama el estándar local de reposo (LSR). Tenga en cuenta que el Sol se mueve con respecto al LSR.



Al observar a lo largo de la línea de visión hacia la longitud  $\ell$ , el observador ve la emisión de gas a diferentes distancias del Centro Galáctico. Suponiendo que la velocidad de rotación  $v_{\text{rot}}(R)$  del gas no aumenta significativamente con el aumento del radio, el gas cuyo vector de velocidad total está a lo largo de la dirección de observación tendrá una magnitud neta máxima de la velocidad de la línea de visión,  $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$ . Por geometría,

$$v_{\text{rot}}(R) = v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell) + v_0 \sin(\ell),$$

donde  $R = R_0 \sin \ell$ ,  $R_0$  es la distancia del Sol al Centro Galáctico (8.5 kpc) y  $v_{\text{rot}}(R)$  es la velocidad de rotación tangencial del gas a una distancia  $R$  del Centro Galáctico. Inferiremos  $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$  utilizando los datos observados de la línea de emisión de HI. Para longitudes galácticas  $20 < \ell < 90$  grados, esto corresponde a la emisión con el mayor corrimiento al rojo.

Dado que tanto el Sol como la Tierra no están en reposo con respecto al LSR, las velocidades observadas de la línea de HI deben corregirse por (a) la rotación de la Tierra, (b) su revolución alrededor del Sol y (c) el movimiento del Sol relativo al LSR. Estos movimientos se combinan en una velocidad de corrección de la línea de visión ( $v_{\text{corr}}$ ), que depende de la ubicación del observador, la dirección de observación y la fecha y hora de la observación. Se le proporcionarán herramientas para calcular ( $v_{\text{corr}}$ ), de modo que las velocidades medidas ( $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ ) puedan convertirse a velocidades con respecto al LSR,  $v_{\text{LSR}}$ , tal que

$$v_{\text{LSR}} = v_{\text{Earth}}^{\text{obs}} + v_{\text{corr}}.$$

La cantidad  $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$  puede determinarse utilizando la frecuencia observada  $f_{\text{obs}}$  que está maximamente corrido al rojo desde  $f_0$ , tal que

$$v_{\text{Earth}}^{\text{obs}} = c \left[ \frac{f_0 - f_{\text{obs}}}{f_0} \right].$$

Así, las observaciones de la emisión de HI del disco galáctico nos permiten determinar la curva de rotación de la Vía Láctea,  $v_{\text{rot}}(R)$ , que puede usarse para inferir la masa encerrada a varias distancias ( $R$ ) del Centro Galáctico.

### Calibración de la salida de potencia del telescopio:

La emisión de radio recibida de una fuente se expresa comúnmente en términos de una temperatura equivalente  $T^{\text{src}}$  (llamada temperatura de brillo) de un cuerpo negro (hipotético) que emitiría la misma intensidad a una frecuencia dada sobre el ángulo sólido de la fuente. En el régimen de Rayleigh-Jeans,  $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$ , donde  $P$  es la potencia promedio recibida de una fuente con temperatura  $T^{\text{src}}$  en un intervalo de frecuencia con ancho  $\Delta f$ . En radioastronomía, la potencia y la temperatura se utilizan de manera equivalente.

La temperatura equivalente de la potencia de radio recibida por un telescopio es un promedio de  $T^{\text{src}}$  sobre un ángulo sólido llamado área del haz, que está relacionada con la resolución del telescopio. Esta temperatura equivalente se llama temperatura de la antena,  $T_{\text{ant}}$ . Además, todo el sistema del telescopio también añade algo de potencia de ruido, descrita por la llamada temperatura del receptor,  $T_{\text{recv}}$ . Juntas, la temperatura de la antena y la temperatura del receptor suman la temperatura del sistema,

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{ant}} + T_{\text{recv}},$$

que corresponde a la potencia total medida por el telescopio. El telescopio registra la potencia después de ser amplificada por un factor de ganancia  $G_R$  de tal manera que en un modelo simplificado podemos expresar

$$P_{\text{out}} = k_B G_R [T_{\text{ant}} + T_{\text{recv}}] \Delta f,$$

donde  $P_{\text{out}}$ ,  $G_R$ ,  $T_{\text{ant}}$  y  $T_{\text{recv}}$  son todas funciones de la frecuencia.

Así, en cada frecuencia, hay dos incógnitas por determinar,  $G_R$  y  $T_{\text{recv}}$ , para determinar  $T_{\text{ant}}$  a partir del  $P_{\text{out}}$  medido. Determinaremos estas dos incógnitas apuntando el telescopio a dos fuentes estándar asumiendo que llenan completamente el campo de visión del telescopio y tienen temperaturas de antena conocidas, y midiendo las potencias recibidas.

Apuntaremos el telescopio a

- el 'suelo', que se asume tiene una temperatura de antena  $T_{\text{ground}} = 300$  K, y
- una parte fría del 'cielo' alejada del plano galáctico con una temperatura de antena asumida  $T_{\text{sky}} = 5$  K.

Se puede asumir que estas temperaturas de calibración son independientes de la frecuencia en la banda de interés. Así, se necesita resolver las siguientes dos ecuaciones en cada frecuencia

$$P_{\text{out}}^{\text{ground}} = k_B G_R [T_{\text{ground}} + T_{\text{recv}}] \Delta f$$

$$P_{\text{out}}^{\text{sky}} = k_B G_R [T_{\text{sky}} + T_{\text{recv}}] \Delta f.$$

Se le proporcionarán herramientas que resolverán estas ecuaciones y determinarán la  $T_{\text{recv}}$  dependiente de la frecuencia y el  $G_R$  que se pueden usar para obtener  $T_{\text{ant}}$  para mediciones adicionales. Tenga en cuenta que realizar tanto las mediciones del Suelo como del Cielo es esencial para obtener un espectro de la línea de emisión HI adecuadamente calibrado.

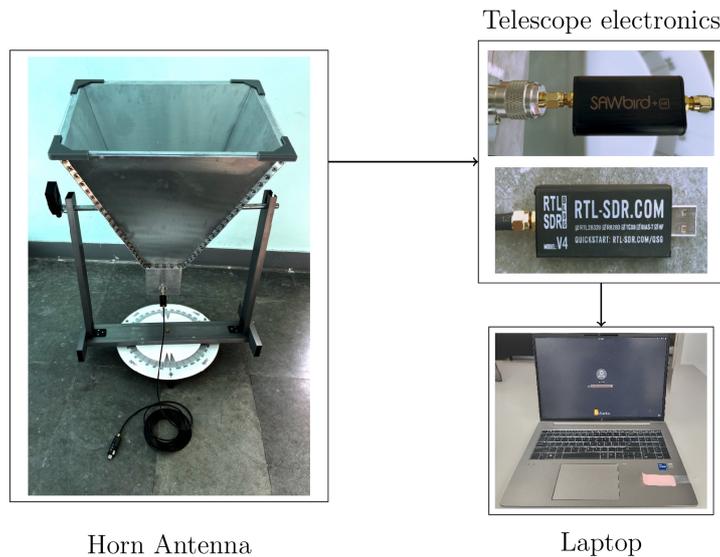
Debido a que nuestro telescopio tiene baja resolución angular, puede resultarle difícil apuntar a una región del cielo completamente libre de gas HI de nuestra Galaxia. La emisión de gas fuera del plano galáctico y otras fuentes de ruido pueden afectar la medición del cielo. Enmascararemos dicho rango espectral durante la calibración.

La línea de emisión HI aparece como un exceso en la intensidad de radio relativa al fondo a una frecuencia y dirección dadas. Dado un  $G_R$  y  $T_{\text{recv}}$  conocidos, la sensibilidad expresada como la temperatura de ruido r.m.s.,  $\sigma_T$ , de un radiotelescopio que observa una temperatura del sistema  $T_{\text{sys}}$ , en un intervalo de frecuencia  $\Delta f$  (en Hz), se da por

$$\sigma_T = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\Delta f \times t_{\text{int}}}},$$

donde  $t_{int}$  es el tiempo de integración en segundos.

### Equipamiento y software:



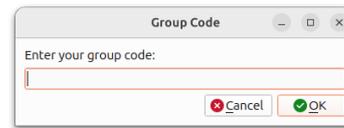
- Un radiotelescopio de antena de bocina en un montaje alt-azimutal. El azimut se puede medir con la escala de transportador en la base del montaje. La altitud se puede medir usando el inclinómetro digital como se muestra a continuación.



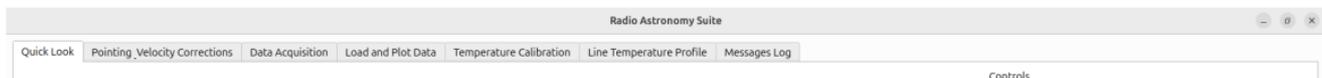
- El telescopio incluye unidades electrónicas que amplifican la señal, filtran el rango de frecuencia deseado y generan un espectro.
- Una computadora portátil equipada para leer y mostrar, registrar datos, calibrar y analizar la salida del telescopio.

### Uso del telescopio y software:

- Su configuración del telescopio ya está alineada con el norte. Asegúrese de que el cero grados en el dial horizontal coincida con la marca "N" (norte) en la mesa.
- Haga doble clic en el icono - "Galactic Rotation Curve" en la pantalla de la computadora portátil para iniciar el programa.



- Ingrese su código de grupo y presione “OK”.
  - Aparecerá una carpeta con su código de grupo en el Escritorio. Necesita almacenar todos sus archivos de datos en esta carpeta.
  - El sistema se encenderá y verá un LED blanco encenderse.
  - Se abrirá la interfaz “Radio Astronomy Suite”.



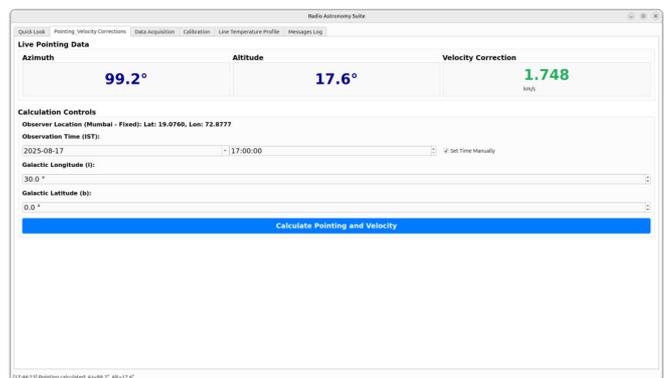
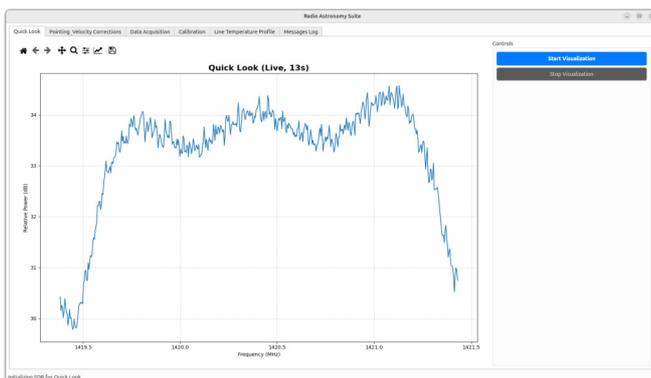
La “Suite de Radioastronomía” tiene las siguientes pestañas:

- **Pestaña 1: Vista Rápida**

La pestaña 1 proporciona una verificación rápida del sistema para verificar que la señal de radio se está grabando correctamente. Ejecuta un código que traza la señal recibida (potencia relativa) en el eje Y contra la frecuencia observada en el eje X.

1. Apunte el telescopio primero hacia el cielo y luego hacia el suelo, y observe el cambio resultante en la amplitud de la señal.
2. El código monitorea el espectro de la señal en vivo durante 60 s, pero **no** guarda los datos.

Informe inmediatamente al supervisor si la amplitud de la señal permanece sin cambios cuando se varía la orientación del telescopio.

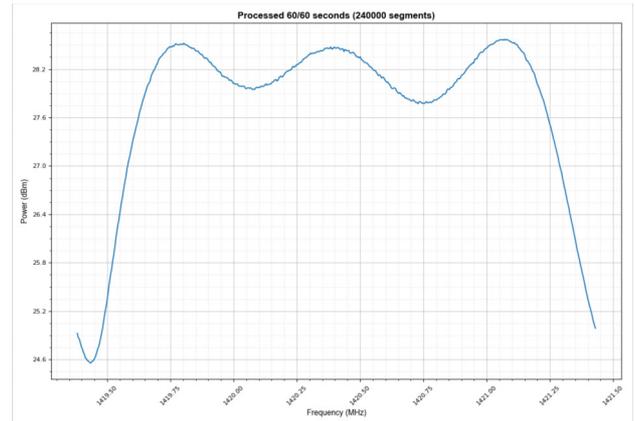
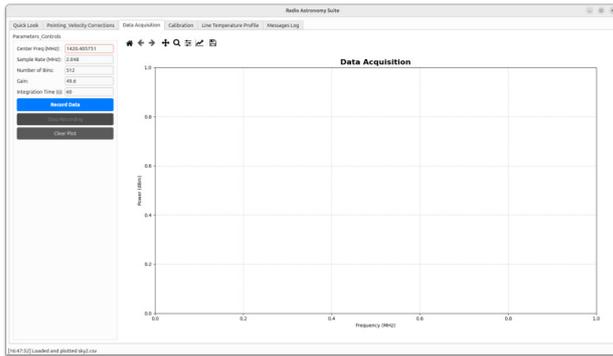


- **Pestaña 2: Corrección de Apuntamiento y Velocidad**

La pestaña 2 convierte la longitud y latitud galácticas especificadas en altitud y acimut para la fecha y hora actuales. Introduzca las coordenadas galácticas deseadas para obtener los valores correspondientes de altitud y acimut, junto con la corrección de velocidad,  $v_{corr}$ .

- **Pestaña 3: Adquisición de Datos**

La pestaña 3 te permite registrar los datos. Tiene tres botones: (i) Registrar Datos, (ii) Detener Registro, y (iii) Limpiar Gráfico.



Al hacer clic en **Registrar Datos** comienza la adquisición de datos por un tiempo de integración de 60 s en la dirección en la que actualmente apunta el telescopio. Aparecerá un cuadro de diálogo solicitándote nombrar y guardar los datos del espectro en un archivo. Si deseas reiniciar la medición antes de que finalice cualquier exposición en curso, utiliza el botón **Detener Registro**. El botón **Limpiar Gráfico** elimina el gráfico mostrado de la pantalla.

**Precaución:** No apuntes el telescopio entre azimut  $0^\circ$  y  $40^\circ$  (o entre  $240^\circ$  y  $360^\circ$ ) cuando la altitud esté por debajo de  $40^\circ$  para evitar señales interferentes de una antena de torre móvil ubicada cerca del lugar.

Para medir la emisión HI de 21 cm del disco galáctico en una longitud galáctica dada, realiza los siguientes pasos:

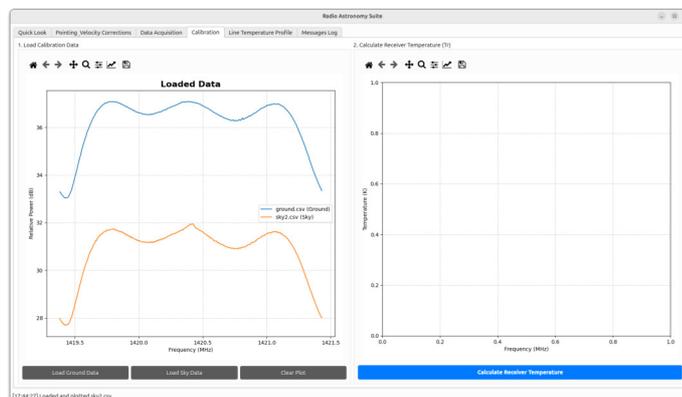
1. Primero usa la Pestaña 2 para calcular y anotar la altitud, azimut y  $v_{\text{corr}}$  para la longitud galáctica que deseas observar.
2. Luego apunta el telescopio a la ubicación deseada de longitud galáctica " $l$ " en el cielo y registra el espectro.
3. Guarda el espectro con el nombre de archivo  $l.csv$ .

A continuación, realiza los siguientes pasos secuencialmente para obtener mediciones de calibración.

1. Apunta el telescopio al 'suelo', registra y guarda el espectro con el nombre de archivo **ground.csv**.
2. Apunta al 'cielo', lejos del plano galáctico, registra y guarda el espectro con el nombre de archivo **sky.csv**.

• **Pestaña 4: Calibración**

La pestaña 4 se utiliza para realizar la calibración.



1. Primero, debes cargar los datos de **suelo** y **cielo** haciendo clic en los botones correspondientes y seleccionando los archivos apropiados. Una vez cargados, el gráfico de la izquierda mostrará la salida de potencia relativa tanto para el cielo como para el suelo.

2. A continuación, haz clic en “**Calibrar ganancia y obtener  $T_{\text{recv}}$** ”. Esto generará un gráfico de  $T_{\text{recv}}$  como función de la frecuencia en el panel de la derecha. Deberías ver datos que consisten en fluctuaciones de ruido, junto con una línea HI contaminante (si la hay) dentro de la vista del telescopio mientras realizas la medición de calibración del ‘cielo’.
3. **Haz clic** a ambos lados de la línea contaminante para definir una región que se enmascarará (mostrada como un área sombreada en gris). El código ajustará entonces una curva suave al resto de los datos y mostrará el  $T_{\text{recv}}$  resultante dependiente de la frecuencia como una línea discontinua verde.

- **Pestaña 5. Análisis de la línea HI**

Esta pestaña aplica la calibración obtenida en la Pestaña 4 para extraer el espectro de emisión de la línea HI de las mediciones tomadas en la Pestaña 3 a través de diferentes longitudes galácticas.

Para cada medición en una longitud dada, realizarás los siguientes pasos:

1. Cargar el archivo  $\ell$ .**csv**.
2. Haz clic en el botón “Perfil de temperatura de línea”, y se abrirá una nueva pestaña titulada “Temperatura de Línea HI”. Verás un gráfico de la temperatura de la línea HI después de aplicar la ganancia y la calibración  $T_{\text{recv}}$ . Además, se ha restado una línea base correspondiente al fondo del cielo de 5 K.
3. La frecuencia más desplazada al rojo ( $f_{\text{obs}}$ ) perteneciente a la línea HI se puede estimar como la frecuencia más baja que tiene una temperatura 5 K por encima del valor inmediato de la línea base. Identifica  $f_{\text{obs}}$  para cada medición.

En el paso final, en caso de que veas un hombro plano de aproximadamente 5 K en el perfil de temperatura de línea en el lado rojo de la línea de emisión, realiza la medición para esa longitud una vez más.