

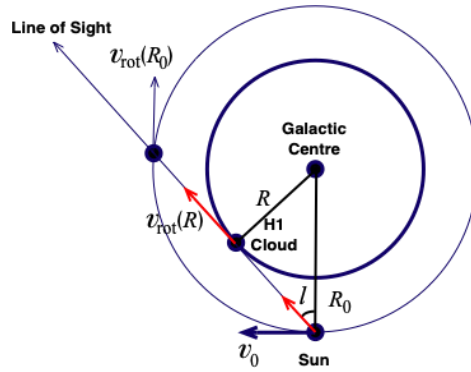
Descobrir a matéria escura galáctica com um radiotelescópio

O Universo contém uma grande quantidade de matéria escura. Vais descobrir a presença da matéria escura na nossa Galáxia medindo a velocidade tangencial de rotação do gás no disco galáctico. O gás presente no disco da Via Láctea contém Hidrogénio atómico neutro (HI), que pode ser detetado através da sua transição de inversão de spin (spin flip), correspondente a uma frequência de repouso de $f_0 = 1420,40575$ MHz. A velocidade de rotação do gás na Galáxia pode ser determinada utilizando o desvio de Doppler desta transição.

A vossa tarefa consiste em medir os espetros da radiação de rádio, entre 1419,0 MHz e 1421,0 MHz, emitida pelo gás no disco galáctico em diferentes longitudes do plano da Galáxia, utilizando um radiotelescópio que vos será fornecido. Irão analisar estes dados para determinar a curva de rotação da Via Láctea. Com base nas velocidades de rotação medidas, irão estimar a massa contida dentro de diferentes distâncias galactocêntricas, compará-las com a massa bariónica conhecida na Galáxia para os mesmos raios, e atribuir qualquer diferença devido à presença de matéria escura.

Contexto teórico

Assume que todo o gás na Galáxia se move no sentido dos ponteiros do relógio (quando visto a partir do Pólo Norte Galáctico) em órbitas circulares, a diferentes distâncias do Centro Galáctico, conforme ilustrado na figura abaixo. Considera-se gás a mover-se com uma velocidade de rotação ($v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$) na posição do Sol. O referencial que roda a esta velocidade designa-se por padrão local de repouso (local standard of rest, LSR). Notem que o Sol se move em relação ao LSR.



Ao observar na direção da linha de visão para uma longitude galáctica ℓ , o observador deteta uma emissão proveniente de um gás a diferentes distâncias do Centro Galáctico. Assumindo que a velocidade de rotação $v_{\text{rot}}(R)$ do gás não aumenta significativamente com o raio, o gás cujo vetor velocidade total está alinhado com a direção de observação apresentará o maior valor absoluto da velocidade radial em relação ao LSR, $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$. Pela geometria,

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

onde $R = R_0 \sin \ell$, R_0 é a distância do Sol ao Centro Galáctico (8,5 kpc) e $v_{\text{rot}}(R)$ é a velocidade tangencial de rotação do gás a uma distância R do Centro Galáctico. Vamos determinar $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ usando os dados observacionais da linha de emissão de HI. Para longitudes galácticas entre $20 < \ell < 90$ graus, isto corresponde à máxima emissão desviada para o vermelho.

Como nem o Sol nem a Terra estão em repouso em relação ao LSR, as velocidades observadas da linha de HI devem ser corrigidas para ter em conta: (a) a rotação da Terra, (b) a sua translação em torno do Sol e (c) o movimento do Sol em relação ao LSR. Estes movimentos combinam-se numa velocidade de correção ao longo da linha de visão (v_{corr}), que depende da localização do observador, da direção de observação e da data e hora da medição. Irão-vos ser fornecidas ferramentas para calcular (v_{corr}), permitindo converter as velocidades medidas ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) para velocidades em relação ao LSR v_{LSR} , de acordo com:

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

A grandeza $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ pode ser determinada usando a frequência observada f_{obs} , que corresponde ao maior desvio para o vermelho relativamente a f_0 , tal que:

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

Assim, as observações da emissão de HI no disco galáctico permitem determinar a curva de rotação da Via Láctea, $v_{\text{rot}}(R)$, que por sua vez pode ser utilizada para inferir a massa contida a várias distâncias (R) do Centro Galáctico.

Calibração da potência de saída do telescópio:

A radiação de rádio recebida de uma fonte é, habitualmente, expressa em termos de uma temperatura equivalente T^{src} (designada por temperatura de brilho [brightness temperature]) de um corpo negro hipotético que emitiria a mesma intensidade, numa dada frequência, sobre o ângulo sólido da fonte. No regime de Rayleigh–Jeans, $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$, onde P é a potência média recebida de uma fonte com temperatura T^{src} , num intervalo de frequências com largura Δf . Em radioastronomia, potência e temperatura são usadas de forma equivalente.

A temperatura equivalente da potência de rádio recebida por um telescópio é uma média de T^{src} sobre um ângulo sólido denominado por área de feixe (beam area) que está relacionada com a resolução do telescópio. Esta temperatura equivalente designa-se por temperatura da antena (antenna temperature), T_{ant} . Para além disso, todo o sistema do telescópio acrescenta também ruído, descrito pela chamada temperatura do recetor (receiver temperature), T_{recv} . Juntas, a temperatura da antena e a temperatura do recetor somam-se para dar a temperatura do sistema (system temperature):

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

a qual corresponde à potência total medida pelo telescópio. O telescópio regista a potência após esta ser amplificada por um factor de ganho (gain) G_R , tal que, num modelo simplificado, podemos escrever:

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

onde P_{out} , G_R , T_{ant} e T_{recv} são todos dependentes da frequência.

Assim, para cada frequência, existem duas incógnitas a determinar, G_R e T_{recv} , para se poder obter T_{ant} a partir do valor medido de P_{out} . Vamos determinar estas duas incógnitas apontando o telescópio para duas fontes padrão, assumindo que preenchem completamente o campo de visão do telescópio e têm temperaturas de antena conhecidas, e medindo as potências recebidas.

O telescópio será apontado para:

- o “solo” (“ground”), assumindo uma temperatura de antena de $T_{\text{ground}} = 300$ K, e
- uma região fria do “céu”, afastada do plano galáctico, assumindo uma temperatura de antena de $T_{\text{sky}} = 5$ K.

Estas temperaturas de calibração podem ser consideradas independentes da frequência na banda de interesse. Assim, é necessário resolver, para cada frequência, o seguinte sistema de equações:

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

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

Ser-vos-ão fornecidas ferramentas para resolver este sistema e determinar T_{recv} e G_R em função da frequência, que depois poderão ser usados para obter T_{ant} noutras medições. É importante salientar que realizar as medições do “solo” (“ground”) e do “céu” (“sky”) é essencial para obter um espectro calibrado da linha de emissão de HI.

Dado que o nosso telescópio tem baixa resolução angular, poderá ser difícil apontá-lo para uma região do céu totalmente livre do gás de HI da nossa Galáxia. Emissões provenientes do gás fora do plano galáctico e outras fontes de ruído podem afetar a medição do “céu” (“sky”). Iremos mascarar estas regiões espectrais durante a calibração.

A linha de emissão de HI surge como um excesso na intensidade de rádio relativamente ao fundo, a uma dada frequência e direção. Conhecendo G_R e T_{recv} , a sensibilidade de um radiotelescópio, expressa como a temperatura de ruído r.m.s., σ_T , que observa um sistema com uma temperatura T_{sys} , num intervalo de frequência Δf (em Hz), é dada por:

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

onde t_{int} é o tempo de integração em segundos.

Equipamento e software:



Horn Antenna

Telescope electronics



Laptop

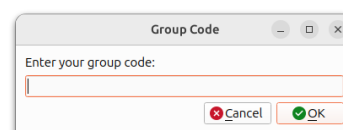
- Um radiotelescópio com antena tipo corneta (horn) numa montagem em altazimutal. O azimute pode ser medido com a escala do transferidor na base da montagem. A altitude pode ser medida utilizando um inclinómetro digital, conforme ilustrado na figura abaixo.



- O telescópio inclui unidades electrónicas que amplificam o sinal, filtram a gama de frequências desejada e produzem um espectro.
- Um computador portátil equipado com software para leitura, visualização, registo, calibração e análise dos dados provenientes do telescópio.

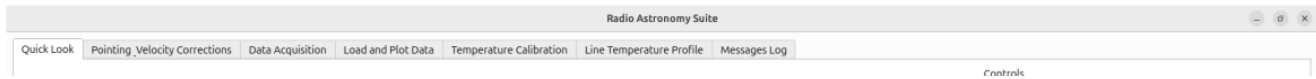
Utilização do telescópio e do software:

- A configuração do telescópio já está alinhada com o Norte. Certifiquem-se de que o grau zero no mostrador horizontal coincide com a marca "N" (norte) na mesa.
- Façam duplo clique no ícone "Galactic Rotation Curve" no ecrã do computador portátil para iniciar o programa.



- Introduzam o código do vosso grupo e primam "OK".

- Será criada no Ambiente de Trabalho uma pasta com o código do vosso grupo. Devem guardar todos os ficheiros de dados nesta pasta.
- O sistema será ligado e verão um LED branco a acender-se.
- Será aberta a interface "Radio Astronomy Suite".



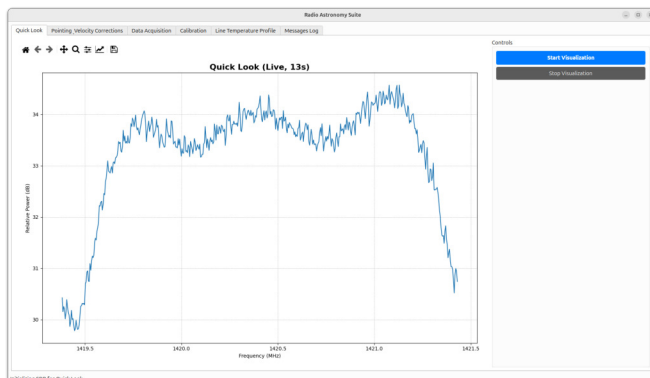
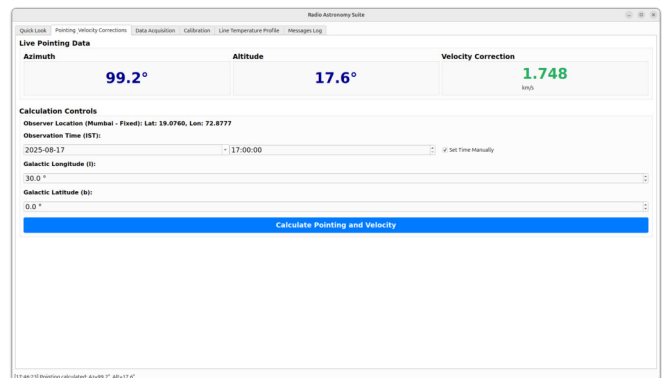
A *Radio Astronomy Suite* tem os seguintes separadores:

• Separador 1: Verificação Rápida

O Separador 1 permite fazer uma verificação rápida do sistema, para confirmar que o sinal de rádio está a ser correctamente registado. Executem um código que representa, no gráfico, o sinal recebido (potência relativa) no eixo Y em função da frequência observada no eixo do X.

1. Apontem o telescópio primeiro para o céu (sky) e depois para o solo (ground), e observem a variação resultante na amplitude do sinal.
2. O código monitoriza o espectro do sinal em tempo real durante 60 s, mas **não guarda** os dados.

Informem de imediato o/a supervisor/a se a amplitude do sinal se mantiver inalterada quando a direção do telescópio for alterada.

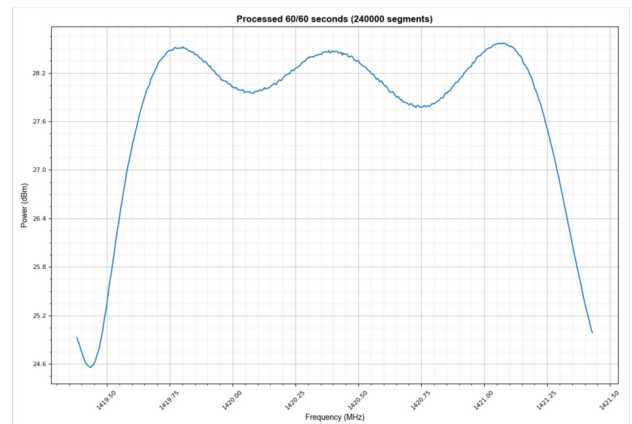
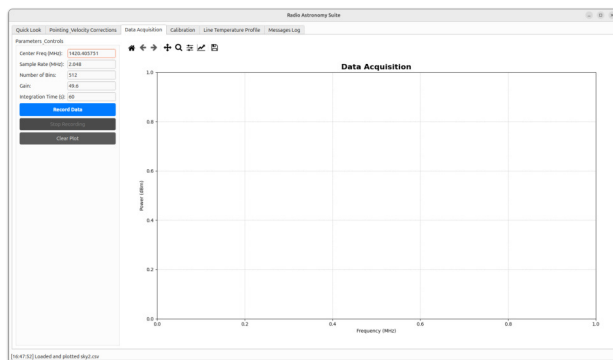



• Separador 2: Apontamento e Correção da Velocidade

O Separador 2 converte uma longitude e latitude galácticas especificadas em valores de altitude e azimuth para a data e hora atuais. Introduzam as coordenadas galácticas desejadas para obterem os valores correspondentes de altitude e azimuth, juntamente com a correção de velocidade, v_{corr} .

• Separador 3: Aquisição de dados

O Separador 3 permite-vos registar os dados. Têm três botões: (i) Gravar Dados, (ii) Parar Gravação e (iii) Limpar Gráfico.



Ao clicarem em **Registrar Dados** iniciam a aquisição de dados para um tempo de integração de 60 s na direção para a qual o telescópio está atualmente a apontar. Irá surgir uma caixa de diálogo que pede para dar um nome e guardar os dados do espectro num ficheiro. Se pretenderem reiniciar a medição antes de qualquer exposição em curso estar concluída, utilizem o botão **Parar registo**. O botão **Limpar gráfico** remove o gráfico apresentado do ecrã.

Precaução: Não apontem o telescópio para os azimutes entre 0° e 40° (ou entre 240° e 360°) quando a altitude for inferior a 40° para evitar sinais de interferência provenientes de uma antena de uma torre de telecomunicações localizada perto do local da observação.

Para medir a emissão HI de 21 cm proveniente do disco galáctico, numa dada longitude galáctica, executem os seguintes passos:

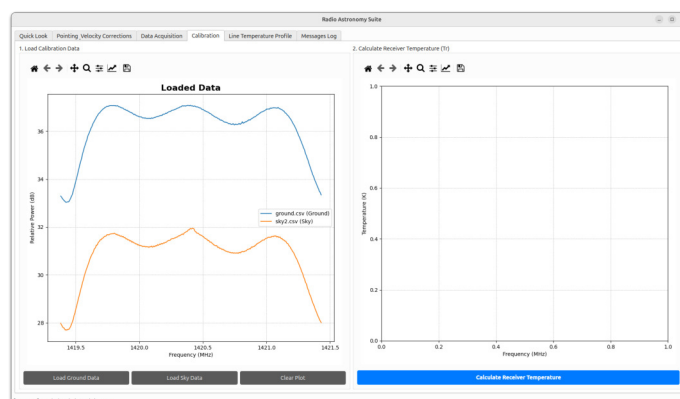
1. Utilizem primeiro o Separador 2 para calcular e anotar a altitude, o azimute e v_{corr} correspondente à longitude galáctica que pretendem observar.
2. Em seguida, apontem o telescópio para a localização desejada, de longitude galáctica " ℓ ", no céu e registem o espectro.
3. Guardem o espectro com o nome de ficheiro ℓ .csv.

De seguida, realizem por esta ordem as medições de calibração.

1. Apontem o telescópio para o "solo", registem e guardem o espectro com o nome de ficheiro **ground.csv**.
2. Apontem para o "céu", afastado do plano galáctico, registem e guardem o espectro com o nome de ficheiro **sky.csv**.

• Separador 4: Calibração

O Separador 4 é utilizado para realizar a calibração.



1. Primeiro, devem carregar os dados do **solo** (ground) e do **céu** (sky), clicando nos respetivos botões e selecionando os ficheiros apropriados. Uma vez carregados, o gráfico do lado esquerdo irá mostrar a potência relativa de saída para o céu e para o solo.

2. De seguida, cliquem em "calibrar ganho e obter T_{recv} " ("Calibrate gain and obtain T_{recv} "). Isto irá gerar um gráfico de T_{recv} em função da frequência, como apresentado no painel da direita. Deverão observar dados com flutuações de ruído, juntamente com uma linha de HI contaminante (se existir) no campo de visão do telescópio durante a medição de calibração para o "céu".
3. **Cliquem em** ambos os lados da linha contaminante para definir uma região a ser mascarada (mostrada como uma área sombreada a cinzento). O código irá então ajustar uma curva suave ao restante conjunto de dados e apresentar o valor resultante de T_{recv} , dependente da frequência, como uma linha tracejada a verde.

• Separador 5. Análise da linha de HI

Este Separador aplica a calibração obtida no Separador 4 para extrair o espectro de emissão da linha de HI das medições realizadas no Separador 3, para diferentes longitudes galácticas.

Para cada medição numa determinada longitude, devem executar os seguintes passos:

1. Carregar o ficheiro ℓ .csv.
2. Clicar no botão "Perfil de temperatura da linha" ("Line temperature profile") que irá abrir um novo Separador intitulado "Temperatura da linha de HI" ("HI Line Temperature"). Irão visualizar um gráfico da temperatura da linha de HI após a aplicação do ganho e a calibração T_{recv} . Além disso, foi subtraída uma linha de base correspondente ao fundo do céu de 5 K.
3. A frequência mais desviada para o vermelho (f_{obs}) pertencente à linha de HI e pode ser estimada como a frequência mais baixa que tem uma temperatura 5 K acima do valor da linha de base imediata adjacente. Identifiquem f_{obs} para cada medição.

Na etapa final, caso observem um ombro (shoulder) plano de cerca de 5 K no perfil de temperatura da linha, no lado vermelho da linha de emissão, voltem a efectuar novamente a medição para essa longitude.