

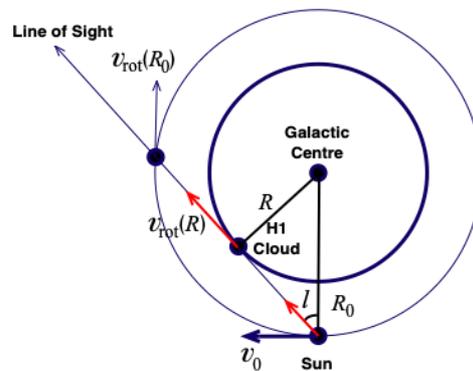
Découvrir la matière noire galactique à l'aide d'un radiotélescope

L'Univers est constitué d'une grande quantité de matière noire. On découvrira la matière noire de notre Galaxie en mesurant la vitesse de rotation tangentielle du gaz du disque de notre Galaxie. Le gaz du disque de la Voie Lactée contient de l'hydrogène atomique neutre (HI) détectable grâce à sa transition de spin inversé, correspondant à une fréquence de repos de $f_0 = 1\,420,40575$ MHz. La vitesse de rotation du gaz dans la Galaxie peut être mesurée grâce au décalage Doppler de cette transition.

Le travail consiste à mesurer les spectres d'émission radio entre 1 419,0 MHz et 1 421,0 MHz émis par le gaz du disque galactique à différentes longitudes du plan galactique, à l'aide d'un radiotélescope mis à votre disposition. On analysera ces données pour mesurer la courbe de rotation de la Voie lactée. A partir des vitesses de rotation mesurées, on estimera la masse enfermée à différentes distances galactiques, la comparera à la masse baryonique connue de la Galaxie dans les rayons correspondants et attribuera toute différence à la matière noire.

Contexte théorique

On suppose que tout le gaz de la Galaxie se déplace dans le sens des aiguilles d'une montre (vu du pôle Nord galactique) sur des orbites circulaires à différentes distances du centre galactique, comme illustré dans la figure ci-dessous. On considère le gaz se déplaçant à une vitesse de rotation ($v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$) à la position du Soleil. Le référentiel tournant à cette vitesse est appelé standard local de repos (LSR). On note que le Soleil se déplace par rapport au LSR.



En observant le long de la ligne de visée vers la longitude ℓ , l'observateur observe l'émission du gaz à différentes distances du centre galactique. En supposant que la vitesse de rotation $v_{\text{rot}}(R)$ du gaz n'augmente pas significativement avec l'augmentation du rayon, le gaz dont le vecteur vitesse totale est le long de la direction d'observation aura une valeur nette maximale de la vitesse le long de la ligne de visée, $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}$. En géométrie,

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

où $R = R_0 \sin \ell$, R_0 est la distance du Soleil au centre galactique (8,5 kpc) et $v_{\text{rot}}(R)$ est la vitesse de rotation tangentielle du gaz à la distance R du centre galactique. On déduira $v_{\text{LSR}}^{\text{max}}(\ell)$ en utilisant les données de la raie d'émission HI observée. Pour les longitudes galactiques $20 < \ell < 90$ degrés, cela correspond à une émission décalée vers le rouge maximale.

Puisque le Soleil et la Terre ne sont pas au repos par rapport à la LSR, les vitesses observées sur la ligne HI doivent être corrigées pour (a) la rotation de la Terre, (b) sa révolution autour du Soleil et (c) le mouvement du Soleil par rapport à la LSR. Ces mouvements se combinent pour former une correction de la vitesse selon la ligne de visée (v_{corr}), qui dépend de la position de l'observateur, de la direction de visée, ainsi que de la date et de l'heure d'observation. Des outils de calcul (v_{corr}) seront fournis afin de convertir les vitesses mesurées ($v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$) en vitesses par rapport à la LSR, v_{LSR} , telles que

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

La quantité $v_{\text{Earth}}^{\text{obs}}$ peut être déterminée en utilisant la fréquence observée f_{obs} qui est décalée vers le rouge au maximum par rapport à f_0 , de telle sorte que

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

Ainsi, les observations de l'émission HI du disque galactique permettent de déterminer la courbe de rotation de la Voie lactée, $v_{\text{rot}}(R)$, qui peut être utilisée pour déduire la masse contenues à différentes distances (R) du centre galactique.

Étalonnage de la puissance de sortie du télescope :

L'émission radio reçue d'une source est généralement exprimée en termes de température équivalente T^{src} (appelée température de brillance) d'un corps noir (hypothétique) qui émettrait la même intensité à une fréquence donnée sur l'angle solide de la source. Dans le régime de Rayleigh-Jeans, $P = k_B T^{\text{src}} \Delta f$, où P est la puissance moyenne reçue d'une source de température T^{src} dans une plage de fréquences de largeur Δf . Puissance et température sont utilisées de manière équivalente en radioastronomie.

La température équivalente de la puissance radio reçue par un télescope est une moyenne de T^{src} sur un angle solide appelé surface du faisceau, qui est lié à la résolution du télescope. Cette température équivalente est appelée température de l'antenne, T_{ant} . De plus, l'ensemble du système de télescope ajoute également une certaine puissance de bruit, décrite par la température du récepteur, T_{recv} . Ensemble, la température de l'antenne et celle du récepteur s'additionnent pour former la température du système,

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

qui correspond à la puissance totale mesurée par le télescope. Le télescope enregistre la puissance après qu'elle ait été amplifiée par un facteur de gain G_R tel que dans un modèle simplifié, nous pouvons exprimer

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

où P_{out} , G_R , T_{ant} et T_{recv} sont toutes des fonctions de la fréquence.

Ainsi, à chaque fréquence, il y a deux inconnues à déterminer, G_R et T_{recv} , afin de déterminer T_{ant} à partir de la P_{out} mesurée. On déterminera ces deux inconnues en pointant le télescope vers deux sources standard, en supposant qu'elles remplissent entièrement le champ de vision du télescope et que leurs températures d'antenne sont connues, et en mesurant les puissances reçues.

Nous allons pointer le télescope vers

- le « sol » dont on suppose qu'il a une température d'antenne $T_{\text{ground}} = 300$ K, et
- une partie froide du « ciel » éloignée du plan galactique avec une température d'antenne supposée $T_{\text{sky}} = 5$ K.

On peut supposer que ces températures d'étalonnage sont indépendantes de la fréquence dans la bande d'intérêt. Il faut donc résoudre les deux équations suivantes à chaque fréquence

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

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

Des outils seront fournis pour résoudre ces équations et déterminer la valeur de la raie d'

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

dépendant de la fréquence T_{recv} et la G_R qui pourront être utilisées pour obtenir T_{ant} pour des mesures ultérieures. Il est essentiel d'effectuer les mesures au sol et dans le ciel pour obtenir un spectre d'émission HI correctement calibré.

En raison de la faible résolution angulaire de notre télescope, il peut être difficile de pointer vers une région du ciel totalement exempte de gaz HI provenant de notre galaxie. Les émissions de gaz hors du plan galactique et d'autres sources de bruit peuvent affecter la mesure du ciel. Cette plage spectrale sera masquée lors de l'étalonnage.

La raie d'émission HI apparaît comme un excès d'intensité radio par rapport au bruit de fond à une fréquence et une direction données. Étant donné des valeurs connues G_R et T_{recv} , la sensibilité, exprimée par la température de bruit efficace, σ_T , d'un radiotélescope observant la température d'un système T_{sys} , dans un intervalle de fréquence Δf (en Hz), est donnée par

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

où t_{int} est le temps d'intégration en secondes.

Équipement et logiciels :



Horn Antenna

Telescope electronics



Laptop

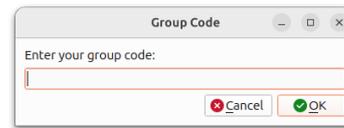
- Un radiotélescope à antenne cornet sur une monture altazimutale. L'azimut peut être mesuré grâce au rapporteur situé à la base de la monture. L'altitude peut être mesurée à l'aide de l'inclinomètre numérique, comme illustré ci-dessous.



- Le télescope comprend des modules électroniques qui amplifient le signal, filtrent la plage de fréquences souhaitée et produisent un spectre.
- Un ordinateur portable équipé de fonctions de lecture et d'affichage, d'enregistrement des données, d'étalonnage et d'analyse des données de sortie du télescope.

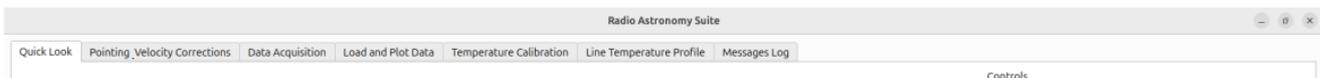
Utilisation du télescope et du logiciel :

- Le télescope est déjà aligné avec le nord. Vérifier que le zéro degré du cadran horizontal coïncide avec le repère « N » (nord) sur la table.
- Double-cliquer sur l'icône « Galactic Rotation Curve » sur l'écran de l'ordinateur portable pour démarrer le programme.



- Entrer votre code de groupe et appuyez sur « OK ».

 - Un dossier contenant le code de groupe apparaîtra sur le bureau. Tous les fichiers de données y seront stocker.
 - Le système sera mis sous tension et une DEL blanche s'allumera.
 - L'interface « Radio Astronomy Suite » s'ouvrira.



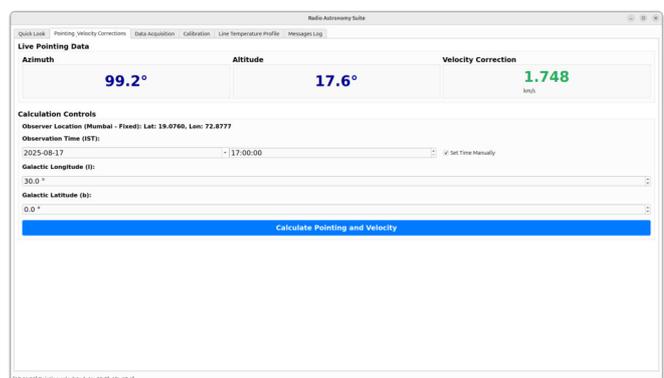
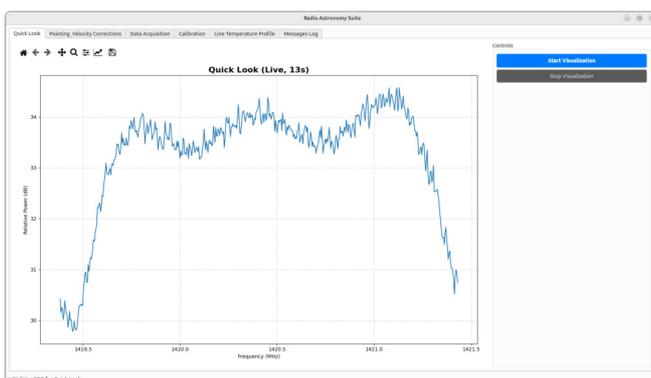
La « Radio Astronomy Suite » comporte les onglets suivants :

- **Onglet 1 : Quick Look**

L'onglet 1 permet une vérification rapide du système pour vérifier que le signal radio est correctement enregistré. Il exécute un code qui trace le signal reçu (puissance relative) sur l'axe des Y par rapport à la fréquence observée sur l'axe des X.

1. Diriger d'abord le télescope vers le ciel, puis vers le sol, et observer le changement d'amplitude du signal qui en résulte.
2. Le programme affiche le spectre du signal en direct pendant 60 s, mais **n'enregistre pas** les données.

Informez immédiatement le superviseur si l'amplitude du signal reste inchangée lorsque le pointage du télescope est modifié.

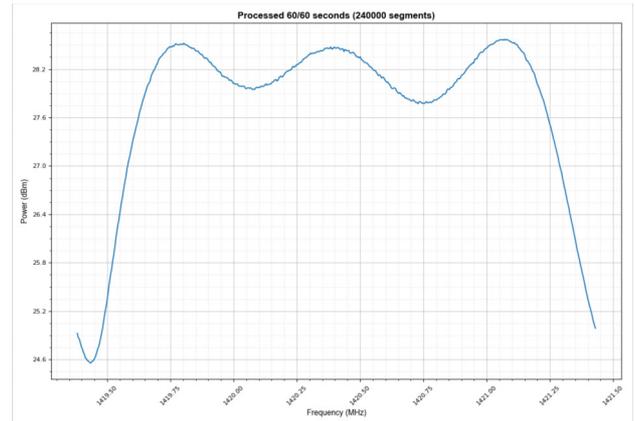
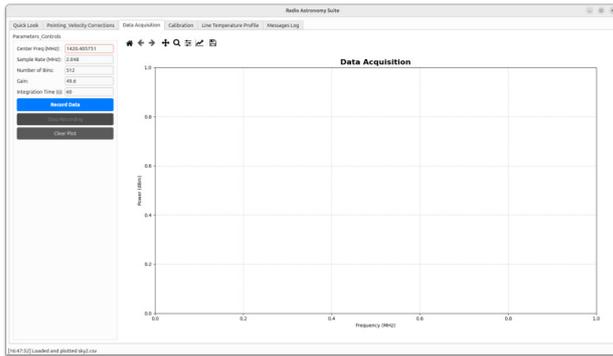


- **Onglet 2 : Pointing and Velocity Correction**

L'onglet 2 convertit la longitude et la latitude galactiques spécifiées en altitude et azimut pour la date et l'heure actuelles. Saisissez les coordonnées galactiques souhaitées pour obtenir les valeurs d'altitude et d'azimut correspondantes, ainsi que la correction de vitesse, v_{corr} .

- **Onglet 3 : Data Acquisition**

L'onglet 3 permet d'enregistrer les données. Il comporte trois boutons : (i) Record Data, (ii) Stop Recording et (iii) Clear Plot.



Cliquer sur « **Record Data** » lance l'acquisition des données pour une durée d'intégration de 60 s dans la direction actuelle du télescope. Une boîte de dialogue apparaît, demandant de nommer et d'enregistrer les données spectrales dans un fichier. Pour reprendre la mesure avant la fin de l'exposition en cours, utiliser le bouton « **Stop Recording** ». Le bouton « **Clear Plot** » supprime le tracé affiché de l'écran.

Précaution : ne pas pointer le télescope entre l'azimut 0° et 40° (ou entre 240° et 360°) lorsque l'altitude est inférieure à 40° pour éviter les interférences des signaux d'une antenne mobile sur une tour située à proximité du lieu de l'événement.

Afin de mesurer l'émission HI de 21 cm du disque galactique à une longitude galactique donnée, procéder comme suit :

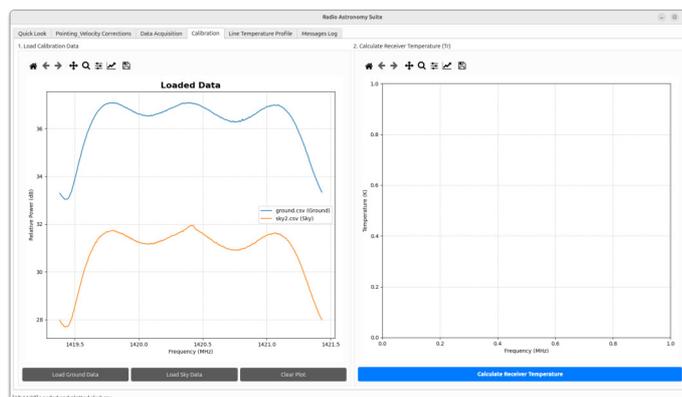
1. Utiliser d'abord l'onglet 2 pour calculer et noter l'altitude, l'azimut et v_{CORR} pour la longitude galactique que l'on souhaite observer.
2. Pointer ensuite le télescope vers l'emplacement souhaité, la longitude galactique « ℓ » dans le ciel et enregistrer le spectre.
3. Enregistrer le spectre avec le nom de fichier ℓ **.csv**.

Ensuite, effectuer les étapes suivantes de manière séquentielle pour obtenir des mesures d'étalonnage.

1. Pointer le télescope vers le « sol », enregistrer et sauvegarder le spectre avec le nom de fichier **ground.csv**.
2. Pointer vers le « ciel », loin du plan galactique, enregistrer et sauvegarder le spectre avec le nom de fichier **sky.csv**.

• **Onglet 4 : Calibration**

L'onglet 4 est utilisé pour effectuer l'étalonnage.



1. D'abord, il faut charger les données **du sol** << **ground** >> et **du ciel** << **sky** >> en cliquant sur les boutons correspondants et en sélectionnant les fichiers appropriés. Une fois chargées, le graphique de gauche affichera la puissance relative produite pour le ciel et le sol.

2. Cliquer ensuite sur « **Calibrate gain and obtain T_{recv}** ». Cela générera un graphique de T_{recv} en fonction de la fréquence dans le panneau de droite. On devrait voir des données comportant des fluctuations de bruit, ainsi qu'une raie HI indésirable (le cas échéant) dans la vue du télescope lors de la mesure d'étalonnage du « ciel ».
3. **Cliquer** de chaque côté de la raie indésirable pour définir une zone à masquer (affichée en gris). Le programme ajustera ensuite une courbe lisse au reste des données et affichera la valeur résultante T_{recv} dépendante de la fréquence sous forme de ligne pointillée verte.