

Observations & Travaux n°86

RADIOASTRONOMIE AMATEUR

Observation des galaxies M31 et M33 @ 21cm

Ne pas copier, reproduire ou traduire sans autorisation. Merci..

Don't copy, reuse or translate without any authorization. Thank you

JJ MAINTOUX - F1EHN

<http://www.f1ehn.org>



Revue Technique de la Société Astronomique de France - Décembre 2018

Radioastronomie d'amateur : Observation des galaxies M31 et M33 @ 21cm

Amateur radio astronomy : 21 cm hydrogen survey of M31 and M33 galaxies

Jean-Jacques MAINTOUX - F1EHN

Résumé :

Les résultats de l'observation de notre Galaxie (Voie Lactée) en 21cm, publiée dans l'Astronomie n° 54 et 55 (octobre et novembre 2012), ont montré que les performances de mon radiotélescope (RT) moyennant quelques adaptations pourraient permettre d'observer d'autres objets présentant un rayonnement de plus faible intensité. Notre groupe local [1] héberge quelques dizaines de galaxies. Le rayonnement H I (Hydrogène neutre à 21cm) est un outil très pratique pour étudier le milieu interstellaire (ISM) de ces galaxies. La note [2] présente les principales galaxies voisines et c'est NGC224 ou M31 et NGC45 ou M33 qui ont retenu mon attention de par leur étendue et leur niveau de rayonnement H I semblant accessible à mon RT. Cette note présente les techniques de mesure mise en œuvre ainsi que les principaux résultats obtenus.

Abstract :

The results of the 21cm survey of our Galaxy (Milky Way), published in Astronomy n°54 and 55 (October and November 2012), showed that the performances of my radio telescope (RT) could allow, with some adaptations, the observation of other objects with fainter intensity radiation. Our local group [1] hosts a few dozen galaxies. The H I radiation (neutral hydrogen at 21cm) is a very practical tool for studying the interstellar medium (ISM) of these galaxies. The note [2] presents the main neighboring galaxies. NGC224 (M31) and NGC45 (M33) caught my attention by their size and the level of H I radiation seemingly accessible to my RT. This note presents the deployed measurement techniques as well as the main results obtained.

I. Introduction

Les résultats de l'observation de notre Galaxie (Voie Lactée) en 21cm, publiée dans l'Astronomie n° 54 et 55 (octobre et novembre 2012), ont montré que les performances de mon radiotélescope (RT) moyennant quelques adaptations (voir encart) pourraient permettre d'observer d'autres objets présentant un rayonnement de plus faible intensité. Notre groupe local [1] héberge quelques dizaines de galaxies. Le rayonnement H I (Hydrogène neutre à 21cm) est un outil très pratique pour étudier le milieu interstellaire (ISM) de ces galaxies. La note [2] présente les principales galaxies voisines et c'est NGC224 ou M31 et NGC45 ou M33 qui ont retenu mon attention de par leur étendue et leur niveau de rayonnement H I semblant accessible à mon RT. Ces 2 galaxies spirales permettent une observation classique en radioastronomie (vue de l'extérieur) alors que notre Galaxie a été observée de l'intérieur. Les techniques d'observation sont donc différentes. L'observation du rayonnement H I des galaxies en 21cm se fait dans le domaine spectral (ou fréquentiel).

La mesure de son décalage fréquentiel dû à l'Effet Doppler-Fizeau permet d'en déduire la vitesse radiale de la source observée selon la formule : $\Delta f = -v/\lambda$ avec $\lambda = c / f_0 = 0.211 \text{ m}$ (21cm), $f_0 = 1420.4 \text{ MHz}$, $c = 299,98 \text{ km/s}$, v en km/s et $\Delta f = f \text{ mesurée} - f_0$ en kHz. Les galaxies observées sont complexes car elles comportent un milieu interstellaire en rotation autour de leur centre galactique et elle se déplacent rapidement en se rapprochant de notre Galaxie. L'ensemble des nuages H I contenu dans le milieu interstellaire des galaxies suit le même mouvement de rotation et de déplacement et va donc rayonner une infinité de raies H I décalées à différentes fréquences et ainsi former un ensemble de raies regroupées dans ce que l'on appelle un spectre ou profil spectral intégré comme ceux montrés aux chapitres 3 et 4. L'analyse de ces spectres permet alors de révéler différentes caractéristiques de ces galaxies. Cet article présente en encart l'adaptation du radiotélescope pour réaliser ces mesures spectrales et ses principales caractéristiques, le traitement et la réduction des données acquises ainsi que les principaux résultats de ces 2 observations.

Adaptation et mise en œuvre du radiotélescope

La bande de fréquence dédiée à l'analyse spectrale de l'objet observé est dimensionnée en considérant les caractéristiques dynamiques de cet objet. Dans notre cas, c'est M31 qui est l'objet le plus dimensionnant. En se reportant à la note [3], on peut noter que son spectre s'étend sur près de 600 km/s ce qui représente une bande passante (Δf) utile (ou bande d'intérêt) de l'ordre de 3 MHz. En prenant en compte le filtrage numérique à effectuer pour limiter la bande de mesure (bande utile + pentes pour atteindre la réjection hors-bande), une fréquence de numérisation (F_s) complexe de 5 MHz est choisie (non critique – liée au matériel disponible) conduisant à une bande de fréquence observable de 4 MHz soit 844 km/s. Les 2 galaxies se rapprochant de notre système solaire à des vitesses élevées de plusieurs centaines de km/s, l'effet Doppler-Fizeau résultant fait que leur spectre est compris entre 0 et -650 km/s. Pour ces mesures, la bande de fréquence utile est choisie centrée entre 0 et +4MHz conduisant à des mesures spectrales entre 0 et -844 km/s. En se reportant aux résultats des notes [3] et [4], on note qu'une résolution vitesse de l'ordre de 5 à 10 km/s est utilisée. Le traitement retenu pour l'analyse spectrale est fait par FFT successives (FFT = transformée de Fourier rapide). Chaque FFT de 128 points (ou binFFT) conduit à une résolution de 8.2 km/s et un canal fréquentiel FFT B_w de 39.06 kHz (voir détails dans Tableau 1).

L'autre élément important est la sensibilité du radiotélescope. Elle est déterminée par sa température de bruit système liée à la conception du récepteur du RT, à son antenne et l'environnement qu'elle capte comme le fond diffus cosmologique (Cosmologic Microwave Background) bien connu à 2.7K ainsi que la pollution radioélectrique en IDF. La somme des températures de bruit du récepteur, de l'antenne et son environnement est appelée Température Système exprimée en kelvin (comme une température thermique) et sa valeur est $T_{sys} = 60K$. Si une source de rayonnement radio se présente dans l'ouverture angulaire de l'antenne alors la température de cette source s'ajoute à la température d'antenne, donc au T_{sys} . Cette température de source peut être calculer à partir du flux de la radiosource F (exprimé en $Jy = 10E-26 W/m^2/Hz$) et de la surface effective (A_e) de captation de l'antenne en m^2 soit $T_{source} = F \cdot A_e / k$ avec $k = cste$ de Boltzman = $1.38 \cdot 10E-23 J/K$. A_e , après calibration, est estimée à $4.46m^2$. En radioastronomie, à partir de ces valeurs, il est habituel de définir une constante du RT utilisable pour toutes les observations, ici elle est de 3.2 mK/Jy.

Dans le cas de M31 et M33, la température d'antenne amenée par ces sources est de l'ordre de 0.1 à 0.3 K au maximum et il faut révéler des températures de 0.005 K pour avoir un résultat intéressant. Si l'on ramène cette précision recherchée à T_{sys} , on constate que l'objectif est de révéler des signaux qui sont de l'ordre de 10 000 fois plus faible que la température de bruit système.

De ce constat, 2 précautions majeures s'imposent, obtenir la sensibilité de détection nécessaire et avoir une réponse spectrale (ou fréquentielle) plate et calibrée pour ne pas déformer les spectres et pouvoir évaluer les températures des signaux mesurés.

De la formule standard de sensibilité de détection ou sensibilité radiométrique [9] $S_d = T_{sys} / \sqrt{B_w \cdot T}$, on peut en déduire le temps T d'observation via la formule $T = (T_{sys}^2) / (S_d^2 \cdot B_w)$ ce qui conduit à $T = 1$ h pour $T_{sys} = 60K$, $S_d = 0.005K$ et $B_w = 39$ kHz.

Pour des critères de fiabilité, l'acquisition n'est pas effectuée en continu et l'enregistrement est fragmenté en plusieurs fichiers. Par expérience, 3 heures d'observation sont nécessaires pour acquérir 1 heure de données brutes, les temps d'initialisation de l'acquisition et d'enregistrement étant non négligeables.

Comme en astronomie optique, les temps d'observations très longs mettent en évidence la réponse résiduelle du RT, principalement due à l'imperfection des filtres numériques et analogiques du récepteur, plutôt que le signal d'intérêt. Aussi pour obtenir une mesure permettant d'effectuer des observations répétitives et fiables il y a lieu de concevoir les filtrages avec le plus grand soin pour minimiser les ondulations et ensuite de corriger cette réponse résiduelle pour obtenir ce que l'on appelle une ligne de base horizontale (réponse constante en fonction de la vitesse Doppler – Baseline en Anglais).

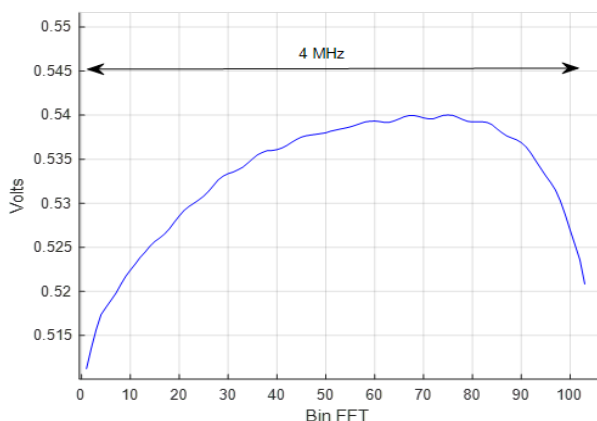


Figure 1 : Réponse spectrale résiduelle du radiotélescope à 21cm

Le principe retenu pour cette correction est donc de mettre en œuvre la même technique qu'en astronomie optique, c'est-à-dire effectuer une mesure de référence pour réaliser l'équivalent des techniques dark, flat et offset. La réponse présentée par la Figure 1 a été obtenue en utilisant le RT dans un mode de fonctionnement identique à celui utilisé pour observer les galaxies. Pour effectuer cette mesure, un masque a été placé devant la source de l'antenne comme le montre la Figure 2 afin de ne pas perturber le fonctionnement du RT et qu'aucun signal externe ne soit reçu.



Figure 2 : Radiotélescope : A gauche lors des observations et à droite lors de son calibrage

Ce masque a été réalisé à l'aide d'un absorbant radiofréquence (à base de carbone) qui se comporte alors comme un parfait corps noir. Donc cet objet permet également de calibrer le RT sur un flux connu, cet absorbant étant à la température ambiante proche de 15° ce jour-là, soit env. 288 K (pour mémoire, le 0° absolu correspond à -273 K). Cette calibration permet par la suite de convertir les signaux mesurés en températures d'antenne exprimées en K.

La réponse instrumentale résiduelle de la Figure 1 est mémorisée. Elle sera ensuite utilisée comme référence et retranchée des différentes mesures spectrales effectuées afin de restituer la température d'antenne liée au signal ou flux de l'objet observé. Ces modifications et essais de mise au point se sont étalés sur 1 an et demi. Dans la suite de cet article, les spectres présentés sont tous corrigés en utilisant toujours la même courbe de correction. Le chapitre 2 présente la méthode utilisée.

Le Tableau 1 ci-dessous présente les principales caractéristiques du radiotélescope.

Caractéristiques	Valeurs	Commentaires
Diamètre d'antenne	3.3m	Avec tourelle 2 axes (alt-azimutal)
Ouverture (HPBW)	4.4 °	Largeur du faisceau à mi-puissance
Aire efficace (Ae)	4.46 m ²	Calibré sur flux solaire
Température de bruit Système	60 K	Incluant la température d'antenne minimale
Fréquence centrale d'observation	1422.40575 MHz	Offset 2 MHz / H I soit -422 km/s
Bande passante spectrale (utile)	4 MHz (844 km/s)	Fréquence d'échantillonnage Fs = 5 MHz
Nombre de canaux vitesse (Doppler)	128	103 utile pour 4 MHz
Résolution spectrale (Bw)	39.06 kHz	Fs / BinFFT => 5 MHz / 128
Résolution vitesse	8.2 km/s	w * λ (avec λ= 0.211 m)
Sensibilité de détection	0.005 K	Pour 1h d'enregistrement (3h de mesure)
Constante du RT	3.2 mK/Jy	Incluant correction et calibration

Tableau 1 : Principales caractéristiques du RT

II. Méthode utilisée

Dans cette phase de réduction des données (passage de données brutes à des spectres exploitables), le traitement retenu pour l'analyse spectrale est fait par FFT successives (FFT = transformée de Fourier rapide) de 128 points ou binFFT (se reporter à l'encart et Tableau 1). La durée d'une FFT de 128

échantillons à F_s est alors de binFFT/F_s soit $25.6\mu\text{s}$. A partir d'une heure de données brutes enregistrées, il est alors possible de traiter env. 140 millions de FFT ($3600\text{s} / 25.6\mu\text{s}$) ce qui représente le plus grand temps de calcul et la réduction de données principale. Le module de chaque FFT est calculé et une moyenne arithmétique permet d'obtenir un spectre brut comme le montre la Figure 3 ci-dessous.

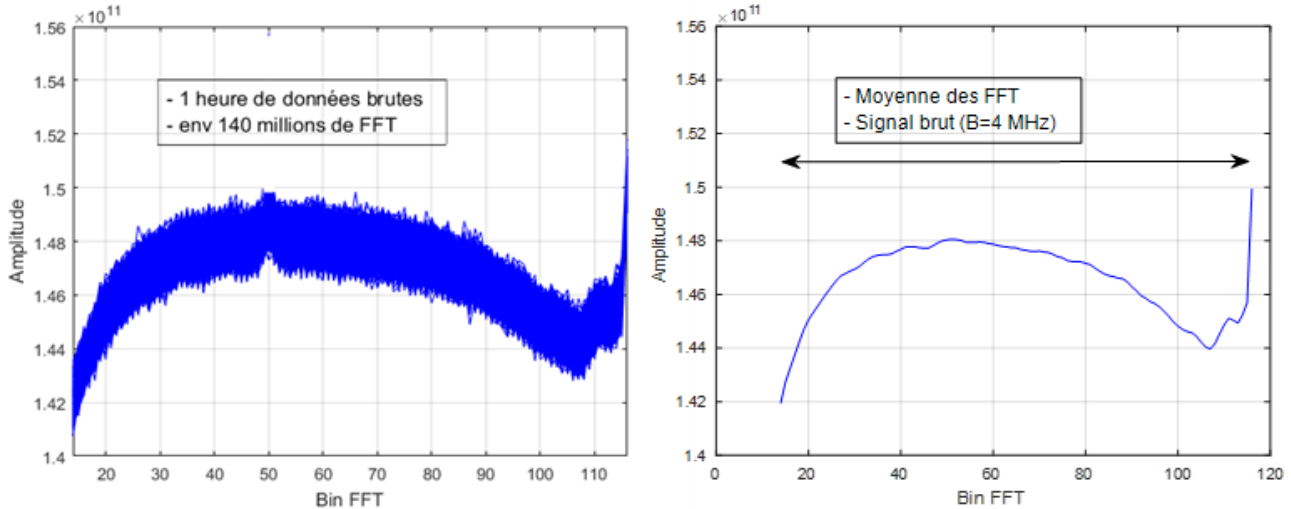


Fig. 3 : Ensemble des FFT (à gauche) et résultat de la moyenne donnant le spectre brut (à droite)

L'étape suivante consiste alors à comparer le signal brut mesuré (S_{mes}) à la référence mémorisée (ref). Pour cela, la référence correspondant à une température d'antenne amenée par un corps noir à 288K (se reporter à l'adaptation du RT) est normalisée par rapport à T_{sys} selon l'équation $S_{ref} = ref / \sqrt{((T_{sys}CN / T_{sys}))}$. Les 2 signaux, mesure et référence (S_{mes} et S_{ref}), sont alors dans le même référentiel et sont présentés à gauche de la Figure 4. En effectuant le ratio de ces 2 signaux suivant la formule suivante, $T_{ant} = ((S_{mes}/S_{ref})^2 - 1) * T_{sys}$, on convertit alors le signal mesuré en température d'antenne. L'élévation à la puissance carrée provient du passage du domaine de tension à celui de puissance. Si les 2

signaux S_{mes} et S_{ref} sont identiques, la température d'antenne amenée par l'objet mesuré est alors nulle. Toutefois, pour terminer cette étape de correction, il a été nécessaire de retrancher une seconde correction de ligne de base (pour compléter le « Flat »), issue d'une mesure effectuée aux coordonnées galactiques 110 / -62 (loin de M31 et du plan galactique), afin d'obtenir une ligne de base plate et reproductible comme le montre la Figure 4 à droite ci-dessous. On peut constater que sans l'utilisation de la référence, le signal H I n'est pas observable sur le graphe de gauche et en conclure que sans l'utilisation d'une référence, l'interprétation de ces signaux serait impossible.

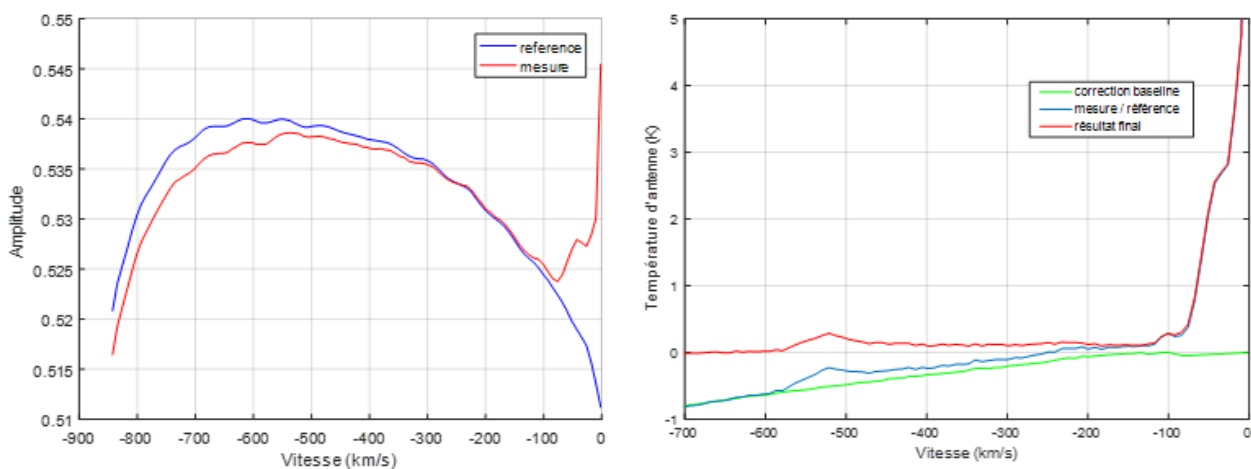


Fig. 4 : A gauche, visualisation de la mesure en rouge et de la référence mémorisée et normalisée en bleu. A droite, la courbe bleue montre le ratio entre mesure et référence. En retranchant la 2ème correction de ligne de base en vert, on obtient alors le spectre final brut en rouge.

Par la suite, toutes les mesures sont corrigées avec cette méthode. Le spectre final présente alors le résultat sous la forme de température d'antenne en K fonction de la vitesse mesurée (Doppler) en km/s. La ligne de base de la courbe rouge est horizontale et le spectre brut de l'objet est exploitable. Le spectre brut de la Figure 5 ci-dessous montre qu'une correction supplémentaire est nécessaire.

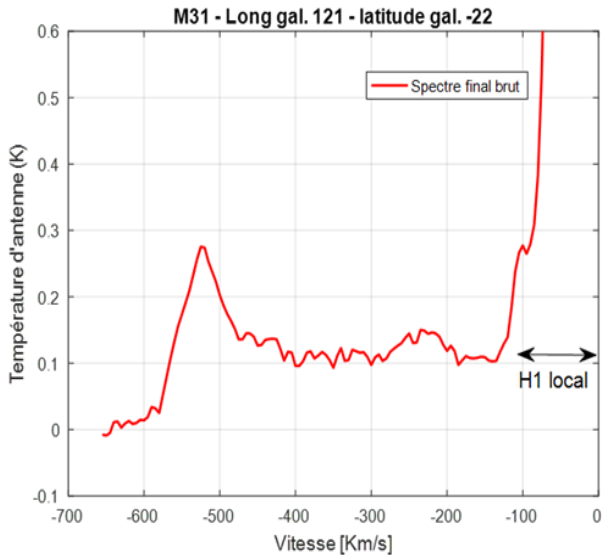


Fig. 5 : Spectre final brut (ici centre de M31). Il faut noter la présence de raies liées au rayonnement H I local

Toutes les mesures effectuées sont polluées par des raies spectrales provenant de l'hydrogène neutre (H I) de notre Galaxie (H I local). Ces raies sont comprises entre 0 et -105 km/s. Les raies à 0 et -40 km/s pour M31 et -50 km/s pour M33 sont respectivement mentionnées par les notes [3] et [4]. La raie à -105 km/s est captée par le RT car ce dernier ne possède pas la finesse de faisceau d'un RT de plusieurs dizaines de mètres. C'est une raie spectrale très faible issue de notre Galaxie qui apparaît sur tous les spectres relevés autour de M31. Elle n'apparaît pas sur les mesures de M33 qui est plus éloignée du plan galactique. Ces différentes raies doivent être définies manuellement et retranchées pour chaque spectre. Ces raies sont de formes gaussiennes, elles sont calculées selon certaines hypothèses de vitesse et de dispersion issues des notes [3] et [4] et des spectres relevés pour la raie à -105 km/s. La Figure 6 montre l'exemple du traitement d'un spectre de M31. La figure 10 de la référence [7] montre le profil global de la galaxie M31 ainsi que la présence du H I local.

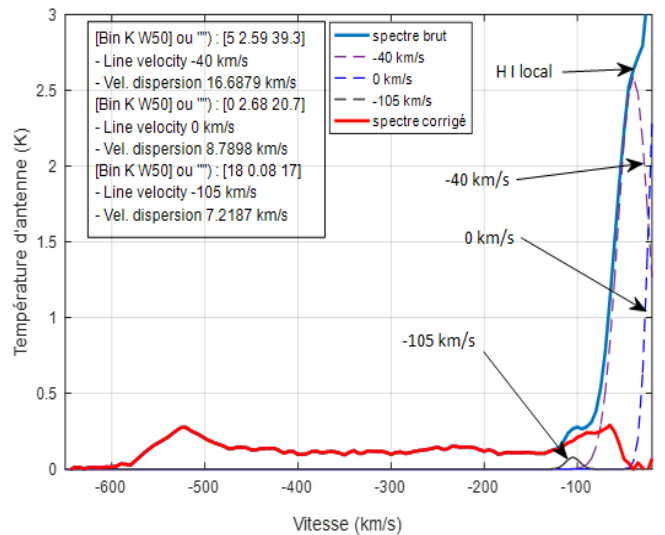


Figure 6 : Procédé pour retirer les raies spectrales liées au H I local. Les raies spectrales calculées sont en pointillé. La courbe bleue montre le spectre brut et la courbe rouge donne le spectre corrigé du H I local (L'échelle Y est de 3K pour montrer la puissance du H I local par rapport au H I rayonné par M31).

Un profil global de vitesse représente la totalité du flux qui serait observé en utilisant une ouverture d'antenne égale à la taille de la galaxie (ou objet) observée. C'est souvent le cas pour un petit RT amateur mais jamais pour les RT géants utilisés par les scientifiques. (voir Figure 7 et Figure 10 des chapitres suivants). Par la suite, les différentes opérations de traitement de données ne seront pas détaillées mais elles ont représenté une très grande partie du temps passé autour de ces observations. Intéressant mais fastidieux. Le stockage des données brutes de M33 et M31 représente de l'ordre de 3 To pour une trentaine d'heures de données brutes. Après réduction, les données représentent de l'ordre de 40 Mo en conservant des calculs intermédiaires. Avec 4 heures de mesures par WE (dont 1 heure de contrôle et stabilisation du système), donnant une dizaine d'heures de traitement (PC) chacune, ces travaux se sont étalés sur 2 années. Toutes les mesures de vitesse sont corrigées et relatives au LSR (Référentiel « Local Standard of Rest » [8]) à mieux que 1 km/s. La précision de mesure est estimée à un 1/2 canal FFT (résolution vitesse/2) soit 4 km/s. Les différentes fréquences utilisées (récepteur, échantillonnage) sont synchronisées par une fréquence de référence dont la stabilité est inférieure à 10⁻⁹. L'erreur totale est donc estimée à 5 km/s max.

III. Galaxie du triangle : M33 – NGC45

M33, la galaxie du Triangle, est une galaxie spirale et elle est la 3ème galaxie la plus importante du Groupe Local. Ses coordonnées galactiques utilisées sont : longitude = 134° / latitude = -31°.

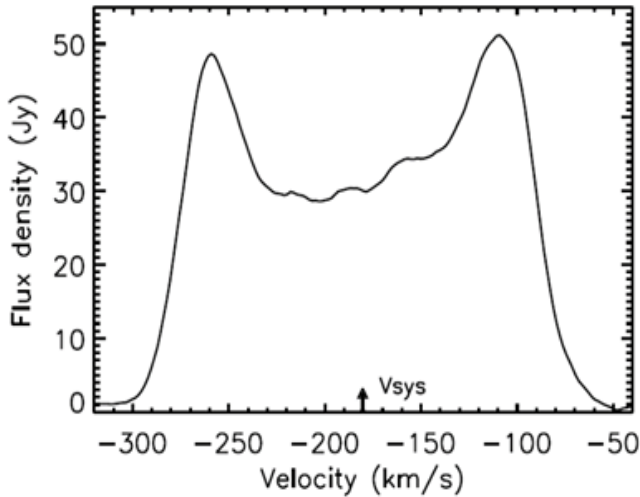


Figure 7 : Profil spectral intégré de M33 d'après référence [4] figure 3.

L'observation de M33 est relativement simple car cette galaxie est très peu étendue sur 73 * 45 arcmin d'après NED (NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE). L'ouverture (HPBW) de l'antenne du RT est de 4.4°. M33 ne peut donc être résolu (HPBW > étendue) et une seule mesure sera effectuée pour révéler son spectre de rayonnement H I. En contrepartie, aucun détail supplémentaire de M33 ne pourra être révélé. La constante du RT est 3.2 mK/Jy (ce qui est très faible mais normal pour un RT amateur de petite taille). La température d'antenne apportée par M33 est alors estimée de 0.1 à 0.16 K. Après enregistrement des données brutes et réduction de données (voir chapitre 2), le spectre de rayonnement H I obtenu est présenté par la Figure 8. Le résultat obtenu est très proche de l'attendu. Il faut toutefois noter que le bruit résiduel entre -300 et -500 km/s est plus important que celui attendu pour 1 heure d'intégration. Cela confirme que nous sommes bien à la limite des performances de ce RT. Ce bruit est lié à des instabilités / imperfections et non au bruit thermique du RT. De la Figure 8, il est possible de relever certaines valeurs telles que $V_a = -89\text{km/s}$, $V_b = -269\text{km/s}$, $\text{Pic1} = -113\text{km/s}$, $\text{Pic2} = -245\text{km/s}$ et d'en déduire certaines quantités remarquables, à savoir :

- Largeur à 50% du flux maximal ($V_a - V_b$) : $W_{50} = 180\text{km/s}$ soit $V_a - V_b$

Sa densité de flux, selon la Figure 7, est entre 30 et 50 Jy. Cette valeur est faible pour un petit RT, mais assez importante pour ce type d'objet situé à 0.845 Mpc (ou 2.7 millions d'année-lumière) ce qui donne une indication sur sa masse importante estimée de 60 à 100 milliards de masses solaires suivant les sources de données.

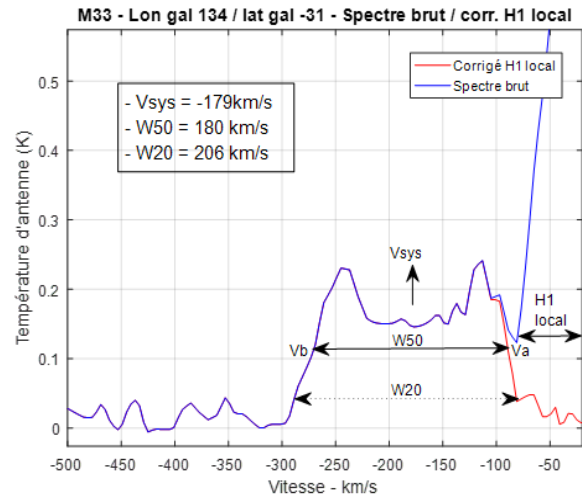


Figure 8 : Spectre H I de M33 brut en bleu et corrigé du H I local en rouge

- Largeur à 20% du flux maximal : $W_{20} = 206\text{ km/s}$
- Vitesse du système M33 : $V_{\text{sys}} = -179\text{ km/s}$ soit moyenne de V_a et V_b ou moyenne des Pic1 et Pic2
- Vitesse de rotation maximale (non corrigée de l'inclinaison) $V_r = 103\text{ km/s}$ soit $W_{20}/2$.

Afin de bien expliquer l'origine des 2 pics, j'ai effectué 3 simulations présentées ci-dessous en Figure 9 grâce au simulateur [5] développé par Joachim Köppen. Cet outil permet de changer les paramètres de la galaxie ainsi que ceux d'observation. Joachim a gentiment incorporé des modes préprogrammés pour M31 et M33 ainsi que les données issues de mes mesures. Les spectres sont centrés sur V_{sys} correspond alors à $V_{\text{rad}} = 0\text{ km/s}$. Il est également important de rappeler que l'on observe les 2 pics simultanément parce que M33 ne peut être résolue à cause de l'ouverture de l'antenne (ce qui est différent pour M31). On peut ainsi constater que c'est grâce à l'inclinaison « i » du plan de rotation de M33 (plan de la galaxie X/Y) incliné par rapport à la ligne de visée (Z) que l'on peut observer la distribution spectrale. Une inclinaison suivant l'axe Y donnerait le même résultat. La rotation autour de l'axe Z (rotation de l'axe majeur) ne modifie pas l'observation. La vue centrale pour l'inclinaison à 55° montre que la mesure coïncide parfaitement avec la simulation mais ce résultat est peu précis. Si l'inclinaison était nulle (plan de la ga-

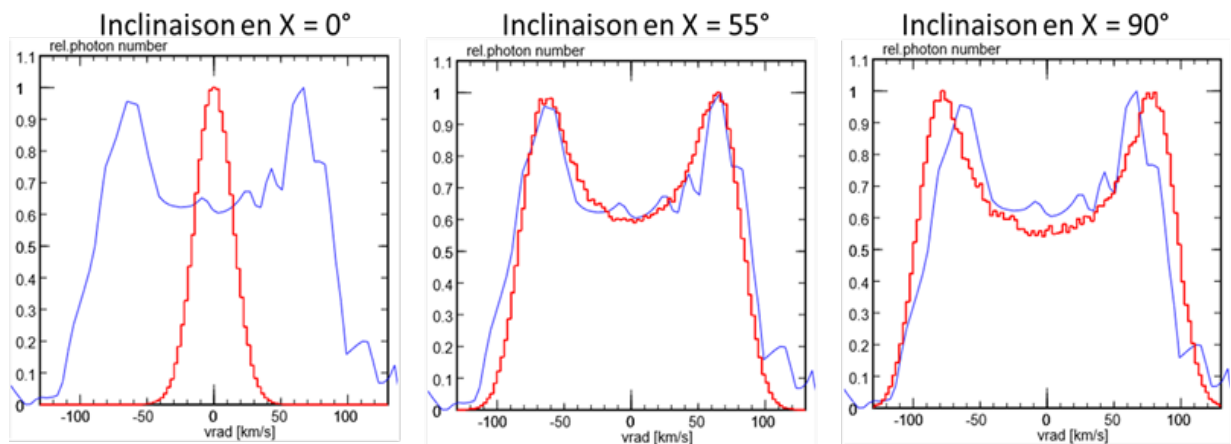


Figure 9 : Simulation (en rouge) du spectre de M33 suivant 3 inclinaisons suivant l'axe X de la galaxie. Spectre mesuré en bleu.

laxie perpendiculaire à l'axe de visée) alors on n'observerait qu'une raie, élargie par la dispersion locale des nuages, à la vitesse de rapprochement V_{sys} . Cette valeur d'inclinaison « i » permet alors de corriger la mesure de la vitesse de rotation V_r . On s'intéresse ici à la $V(r)_{\text{max}}$ permettant de déduire la masse totale de la galaxie contenue dans son rayon r . En effet, pour un système sphérique distribué symétriquement, il est proposé l'approximation dans la référence 6 que la force centrifuge au rayon « r » contrebalance la force gravitationnelle de la masse $M(r)$ incluse dans ce rayon. Soit la relation pour les gaz en orbite $(G \cdot M)/r^2 = v^2/r$ où M est la masse, G la constante gravitationnelle et v la vitesse. Cette référence montre le passage de cette formule courante à la formule de calcul de la masse incluse en masse solaire M_{\odot} , soit : $M = 2.3 \cdot 10^5 \cdot v^2 \cdot r \cdot M_{\odot}$ avec v en km/s et r en kpc. Calculons la vitesse de rotation maximale $v = V_r / \sin(i) \Rightarrow v = 103 / \sin(55)$ soit $v = 126$ km/s. Ce qui donne une masse $M = 8.4 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ pour $r=23$ kpc d'après référence 4 (voir Tableau 2 pour comparaison). Dans la continuité de cette analyse, on peut déterminer la masse d'hydrogène neutre $M(\text{HI})$ en masse

solaire M_{\odot} contenue dans M33 (Galaxie spirale présentant un plan galactique fin). La formule $M(\text{HI}) = 2.36 \cdot 10^5 \cdot D^2 \cdot \int S(v) \cdot dv \cdot M_{\odot}$, où $S(v) \cdot dv$ est appelé « flux intégré » exprimé en Jy km/s . La distance de M33 est $D = 0.845$ Mpc. Du spectre montré Figure 8, on peut calculer la température d'antenne moyenne entre -85 et -289 km/s soit 0.16 K. En utilisant la constante du RT, on obtient $0.16/0.0032 \cdot 204$ soit un flux intégré de 10200 Jy km/s . On peut alors calculer $M(\text{HI}) = 1.72 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Pour terminer, on note que M33 se rapproche de notre système à la vitesse V_{sys} de -179 km/s mesurée ($V_{\text{sys}} = -180$ km/s d'après les mesures scientifiques récentes). Il s'agit de la vitesse radiale héliocentrique. Il n'est malheureusement pas possible de déterminer la distance qui nous sépare de M33. Les perturbations sont trop importantes et les distances trop faibles dans le Groupe Local. Le Tableau 2 ci-dessous présente les différents résultats de cette observation de M33 comparés aux résultats scientifiques récents. Les précisions obtenues sont satisfaisantes. L'erreur de mesure estimée à 5 km/s semble pertinente.

Paramètres de M33	Résultats de l'observation	Résultats référence [4]
Position (centre)	Long. Gal. : 134 / Lat. Gal. : -31	RA 01h33m33.1s / Dec 30°39'18"
Vitesse système (héliocentrique)	-180 km/sec	-179 +/- 3 km/sec
Distance	--	0.84 Mpc
Inclinaison	55° (estimés par simulation)	52° +/- 3°
Position angulaire (axe majeur)	--	202° +/- 1°
W50 Largeur spectrale H I à 50%	180 km/sec	183 km/s
W20 Largeur spectrale H I à 20%	206 km/s	200 km/s
Vitesse de rotation maximum V_{rot}	126 km/s	125 km/s
Masse dynamique ($r = 23$ kpc)	$8.4 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$7.9 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
Masse H I – $M(\text{HI})$	$1.72 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$1.95 \cdot 10^9 M_{\odot}$

Tableau 2 : Principaux résultats de l'observation de la galaxie M33 comparés aux résultats scientifiques

IV. Galaxie d'Andromède : M31 – NGC221

M31, la galaxie d'Andromède, est une galaxie spirale et elle est la 2ème galaxie la plus importante du Groupe Local. Ses coordonnées galactiques utilisées pour son centre sont : longitude = 121° / latitude = -22°. Sa densité de flux, représentée par la Figure 10, est de 40 à 100 Jy. Cette valeur est environ 2 fois plus importante que pour M33. M31 est éloignée de 0.78 Mpc (ou 2.5 millions d'année-lumière). Sa dimension optique est de 190 x 60 minutes d'arc et sa masse peut atteindre 1000 milliards de masses solaires en fonction des limites considérées.



Figure 11 : A gauche : photo de Philippe Bernhard – AAV [<http://aav-astro.fr/>] et à droite : H I distribution en 21 cm - fig 4 de la référence 3

La 1ère observation de M31 est similaire à celle effectuée sur M33. Avec une constante de RT à 3.2 mK/Jy, la température d'antenne apportée par M31 est donc de 0.13 à 0.32 K. Après enregistrement des données brutes et réduction de données (voir chapitre 2), le spectre de rayonnement H I obtenu présente une température d'antenne plus faible que celle attendue. Après vérification, et prise en compte que la dimension de M31 est bien supérieure à celle de M33 et il semble que le RT ne capte pas tout le flux rayonné par M31 en une seule mesure. Une campagne de mesures est donc programmée pour observer toute la surface de M31 comme montré par la Figure 12 ci-dessous et ainsi obtenir toute l'information du flux de M31. En utilisant un pas de mesure plus faible que l'ouverture d'antenne, l'objectif est de révéler quelques caractéristiques supplémentaires de M31 comme sa rotation, l'inclinaison de son axe majeur en plus de son inclinaison. Cette séquence de mesures couvrant 5° par 5° dans les 2 plans tous les 1° permet ainsi de couvrir toute la surface de M31 et en même temps de parcourir son axe majeur incliné de l'ordre de 35 à 40°. La campagne de mesure s'est déroulée sur 1 an et ½. Cela a conduit à un cube de données (datacube) en ajoutant une di-

M31 est très connue en Astronomie que ce soit en observation optique ou en radio comme le montre la Figure 11 ci-dessous.

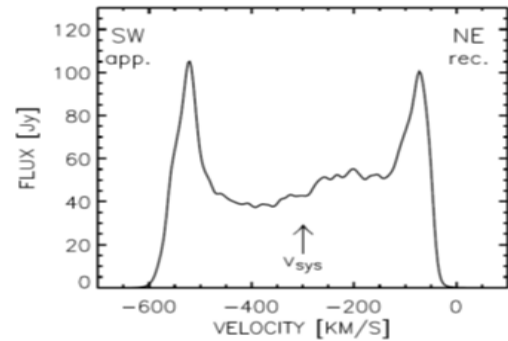
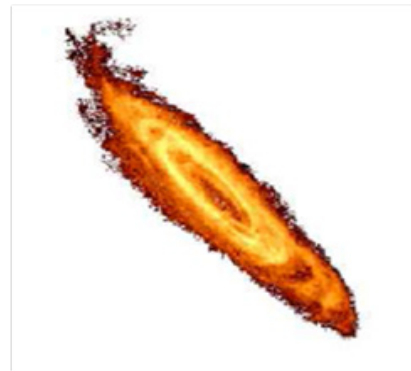


Figure 10 : Profil spectral intégré de M31 d'après référence [3] figure 3



mension aux mesures amateur habituelles (1 mesure / 1 spectre comme pour M33). Ce cube comprend donc 25 spectres (5*5 points de mesures) classés suivant les 2 axes de longitude et latitude galactique. Il n'est pas possible de présenter les 25 spectres dans cet article car ce serait trop volumineux ou illisible. Tous ces spectres ont été corrigés du H I local comme montré plus haut en Figure 5 et Figure 6. Le spectre global intégré est présenté plus bas en Figure 14. L'intérêt du datacube est de pouvoir présenter les résultats de mesure sous forme de cartes de vitesses radiales de M31. J'ai effectué 3 coupes en vitesse selon des valeurs caractéristiques correspondant aux 2 pics de M31 et à sa valeur centrale (V_{sys}). Pour chaque coupe, chaque pixel correspond à une direction d'antenne (Longitude / Latitude galactique) et montre la température d'antenne à la vitesse considérée. Ces 3 coupes sont présentées en Figure 12 et montrent que le pic à -60 km/s se situe dans le NE¹ de la carte (à gauche) et celui à -520 km/s se trouve dans le SO (à droite). Ces 2 pics sont symétriques par rapport au centre abritant les vitesses autour de -300 km/s. Cette vue confirme également la position angulaire de l'axe majeur de l'anneau de M31.

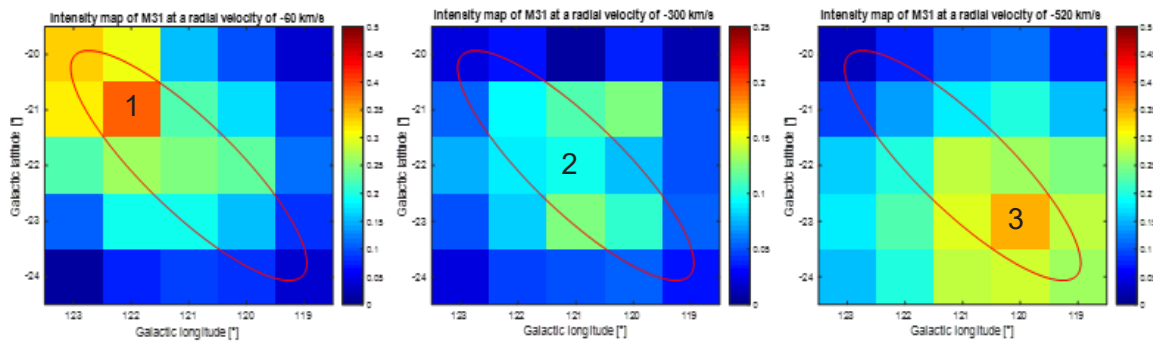


Figure 12 : Carte des vitesses radiales relevées sur M31 (De gauche à droite, coupes à -60, -300 et -520 km/s). L'ellipse en rouge représente la position et l'extension de M31.

Si l'on se réfère à la Figure 13 ci-dessous, on constate que ce résultat de mesure est correct. Mais la faible résolution angulaire du RT ne permet pas d'extraire une courbe de vitesse de rotation en fonction du rayon. La Figure 12 révèle des caractéristiques importantes de la galaxie M31.

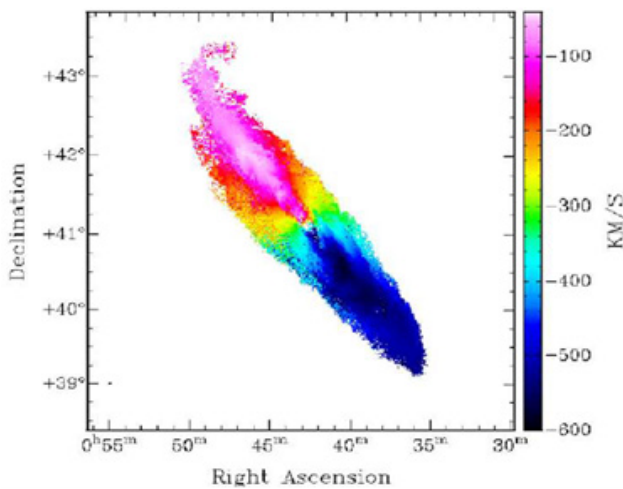


Figure 13 : Figure 8 de la référence [3] montrant le champ de vitesse simulée pour l'anneau de M31

La partie N-E¹ (à gauche - 1) de la galaxie s'approche de nous moins vite que son centre (2) (équivalent à un redshift). Inversement, la partie S-O1 (3) de la galaxie s'approche de nous plus vite que le centre de la galaxie. Ces mesures expliquent pourquoi une simple mesure au centre de M31 n'était pas suffisante et que M31 est plus étendue sur son axe principal (ou majeur) que la surface de captation du RT. La Figure 12 montre également que les 3 mesures 1, 2 et 3 respectivement aux coordonnées galactiques 122/-21, 121/-22 et 120/-23 contiennent la totalité du flux rayonné et capté par l'ouverture du télescope. Il est alors possible de reconstruire un spectre global du flux de M31, montré Figure 14, à partir des 3 spectres correspondant à ces 3 mesures. Comme le montre la Figure 12, les 2 pics au NE et SO de l'axe majeur sont résolus et leur amplitude est donc correcte. Le spectre global est alors obtenu en calculant une moyenne pondérée de manière à respecter l'amplitude des pics de M31. Cette

¹L'échelle des longitudes est inversée par convention, donc l'Est se trouve à gauche, et l'Ouest à droite.

pondération s'explique car ces 3 spectres ne sont pas entièrement résolus par l'ouverture d'antenne – limitation physique liée à la taille d'antenne - et donc chaque spectre contient une partie du spectre adjacent. D'ailleurs un résultat similaire est obtenu en n'utilisant que les spectres 1 et 3. Des travaux sont toujours en cours autour de ce calcul.

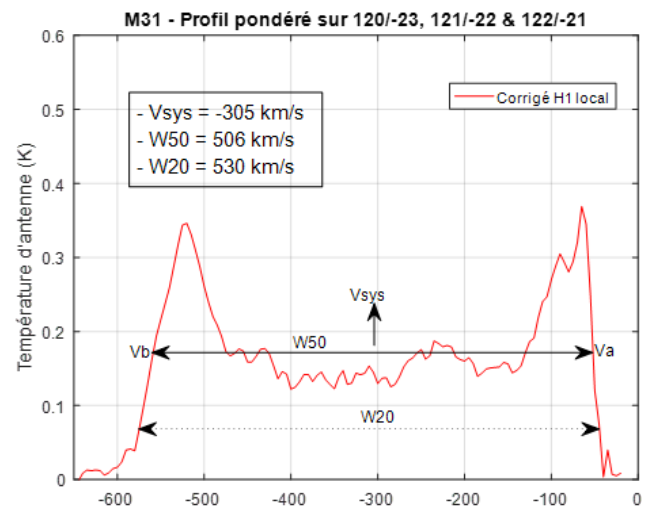


Figure 14 : Profil pondéré de M31 corrigé du H I local

De cette mesure spectrale, il est possible de relever certaines valeurs telles que $V_a = -52\text{km/s}$, $V_b = -558\text{km/s}$, et d'en déduire certaines quantités remarquables, à savoir :

- Largeur à 50% du flux maximal : $W_{50} = 506\text{ km/s}$
- Largeur à 20% du flux maximal : $W_{20} = 530\text{ km/s}$
- Vitesse moyenne du système M31 : $V_{\text{sys}} = -305\text{ km/s} \Rightarrow$ moyenne de V_a et V_b
- Vitesse de rotation maximale (non corrigée de l'inclinaison) $V_r = 265\text{ km/s} \Rightarrow (W_{20}/2)$

Ces valeurs sont très proches des valeurs présentées dans la note [3] comme le montre le Tableau 3. Par la suite, grâce au simulateur [5], j'ai effectué quelques simulations dont seulement 3 sont présentées ci-dessous en Figure 15. Les mesures étaient terminées quand Joachim a développé cet outil mais cette comparaison a permis de vérifier les résultats obtenus. J'ai utilisé le mode préprogrammé pour M31 ainsi que les données issues de mes mesures 1, 2 et 3.

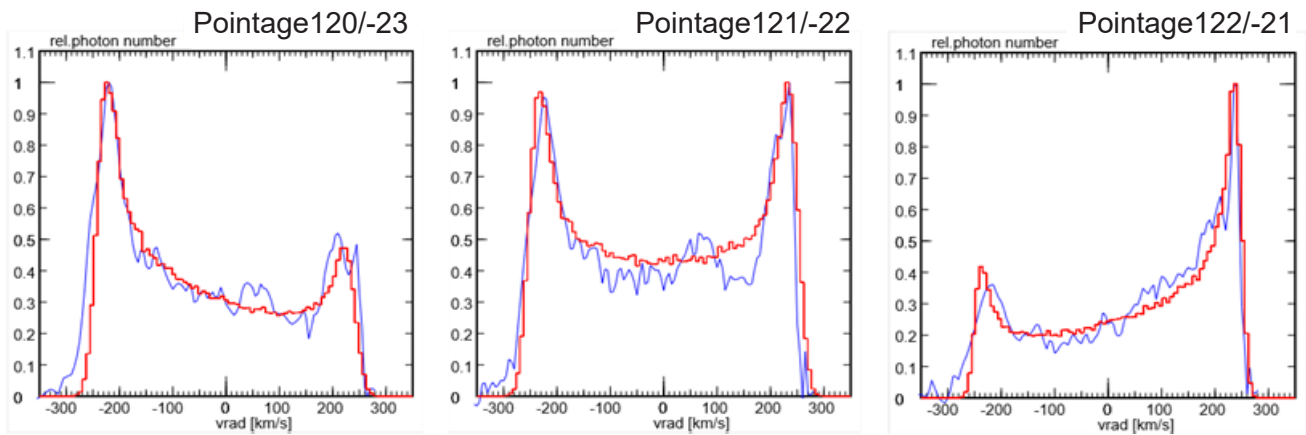


Figure 15 : Spectres simulés pour 3 pointages sur l'axe majeur de M31

En ajustant légèrement les paramètres de la simulation comme la vitesse système, la largeur d'ouverture d'antenne, la dispersion, on constate que les simulations donnent des résultats similaires aux mesures. Ici la largeur d'antenne influe car, comme déjà constaté, les mesures ne sont pas totalement indépendantes (à cause de la résolution angulaire) et l'amplitude du pic le plus faible est liée à cette résolution angulaire ou ouverture d'antenne. Ces résultats confirment l'inclinaison de M31 à 77° . Par la suite, les calculs sont similaires à ceux effectués pour M33 au chapitre précédent. L'inclinaison « i » du plan de M31 est de 77° . Rappelons la formule de calcul de la masse incluse dans le rayon r en masse solaire (M_\odot), soit : $M = 2.3 \cdot 10^5 \cdot v^2 \cdot r M_\odot$ avec v en km/s et r en kpc. Calculons la vitesse de rotation maximale $v = Vr / \sin(i) \Rightarrow v = 265 / \sin(77)$ soit $v = 272$ km/s. Soit $M = 6.4 \cdot 10^{11} M_\odot$ pour un rayon $r = 38$ kpc d'après référence 3. Dans la continuité de cette analyse, on peut déterminer la masse d'hydrogène neutre $M(\text{HI})$ en masse solaire M_\odot contenue dans M31 (Galaxie spirale présentant un plan galactique fin). La formule $M(\text{HI}) = 2.36 \cdot 10^5 \cdot D^2 \cdot \int S(v) \cdot dv$ où $S(v) \cdot dv$ est appelé « flux intégré », exprimée en Jy km/s. Du

spectre montré Figure 8, on peut calculer la température moyenne entre -45 et -575 km/s correspondant à 0.184 k. En utilisant la constante du RT, on obtient $0.184/0.0032 \cdot 530$ soit un flux intégré de 30475 Jy Km/s. La distance de M31 est $D = 0.785$ Mpc, on peut donc calculer $M(\text{HI}) = 4.43 \cdot 10^9 M_\odot$. Pour terminer, on note que M31 se rapproche de notre système solaire à la vitesse V_{sys} de -305 km/s mesurée (vitesse radiale héliocentrique). M31 se rapproche de notre Galaxie à la vitesse de l'ordre de -110 km/s (Vitesse radiale Galactocentrique). Comme pour M33, il n'est pas possible d'évaluer la distance de M31 à partir de ces mesures. Le Tableau 3 ci-dessous présente les différents résultats de cette observation de la galaxie M31 comparés aux résultats scientifiques récents. Les précisions obtenues sont satisfaisantes. L'erreur de mesure estimée à 5 km/s semble également pertinente. L'erreur sur la mesure de la masse de M31 est probablement due à l'extension de cette galaxie. Cette masse peut atteindre $10 \cdot 10^{11} M_\odot$ si l'on considère un rayon plus important. Les valeurs d'inclinaison et de position angulaire sont des estimations guidées par la connaissance du résultat. Elles n'ont qu'une valeur permettant de montrer les possibilités d'une telle observation.

Paramètres	Résultats de l'observation	Résultats référence [3]
Position M31 (centre)	Long. Gal. : 121 / Lat. Gal. : -22	RA 00h42m44.4s / Dec $41^\circ 16' 08''$
Vitesse système (héliocentrique)	-305 km/sec	-300 +/- 4 km/sec
Distance	--	0.785 Mpc
Inclinaison	77° (estimés par simulation)	75°
Position angulaire (axe majeur)	45° (estimés d'après Figure 12)	38°
W50 Largeur spectrale HI à 50%	506 km/sec	509 km/s
W20 Largeur spectrale HI à 20%	530 km/s	533 km/s
Vitesse de rotation maximum V_{rot}	272 km/s	275 km/s
Masse dynamique ($r = 38$ kpc)	$6.4 \cdot 10^{11} M_\odot$	$4.7 \cdot 10^{11} M_\odot$
Masse HI – $M(\text{HI})$	$4.49 \cdot 10^9 M_\odot$	$4.23 \cdot 10^9 M_\odot$

Tableau 3 : Principaux résultats de l'observation de la galaxie M31 comparés aux résultats scientifiques

V. Conclusions

Les adaptations effectuées sur le RT ont permis d'observer de nouveaux objets tels M33 et M31 très rarement accessibles aux RT amateurs. La qualité des mesures et les temps de pause élevés ont permis de compenser en partie le petit diamètre d'antenne.

Même avec cette petite taille d'antenne, il a été possible de révéler des détails de M31 et mettre en évidence son sens et axe de rotation.

Avec des mesures spectrales précises, les chiffres obtenus pour les masses de ces galaxies, leurs teneurs en H I, l'inclinaison et leurs vitesses de rotation sont très proches des valeurs d'origine scientifique obtenues avec des télescopes 10 à 30 fois plus grand comme celui utilisé pour le relevé de M31 en référence [7]. Cette note regroupe de nombreuses mesures et spectres en fonction de la ligne de visée vers M31. Un véritable voyage extragalactique.

Je vous invite à lire en détail les résultats obtenus et présentés par les références [3] et [4]. Les détails révélés par des techniques d'interférométrie sont impressionnants et montrent combien l'écart entre

amateurs et scientifiques reste grand. Ces notes sont également très importantes pour les amateurs car la radioastronomie est un beau passe-temps mais d'une complexité extrême et j'ai quand même eu la chance de pouvoir utiliser des formules dont j'ai déjà du mal à imaginer toutes les relations et dimensions astrophysiques complexes. J'ai également eu la chance de pouvoir échanger avec Joachim Köppen, astrophysicien, radioamateur et auteur du simulateur [5] qui a cette connaissance scientifique et les capacités et la patience d'expliquer simplement ces choses-là. D'autres simulateurs sont disponibles sur son site très riche pour les passionnés de radioastronomie.

Encore une fois j'ai développé tous mes outils et je suis désolé de ne pouvoir donner qq références autres que les notes citées. C'est ce qui me permet de mieux comprendre mes expériences et de les personnaliser en les adaptant au moyen d'essai (RT). Cette activité s'est étalée sur une période de plus de 4 ans (2013 – 2017) et les résultats obtenus [11] n'ont été possibles que grâce aux informations scientifiques détaillées dans les références ci-dessous.

Références

1. Groupe local – Wikipedia
https://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_local
2. J.F. Dean & R.D. Davies - The integrated neutral hydrogen properties of nearby galaxies
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1975MNRAS.170..503D>
3. Laurent Chemin, Claude Carignan and Tyler Foster - H I kinematics and dynamics of Messier 31
<https://arxiv.org/pdf/0909.3846v1>
4. S. Z. Kam, C. Carignan, L. Chemin, T. Foster, E. Elson, T. H. Jarrett - H I kinematics and mass distribution of Messier 33
<https://arxiv.org/pdf/1503.02538>
5. Joachim Köppen - Radio view of a galaxy
<http://portia.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/JS/RadioCubeSimTwo.html>
6. Cours NRAO – H I in external galaxies
<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/HILine.html>
7. T.R. Cram, M.S. Roberts & R.N. Whitehurst - A complete, high-sensitivity 21cm Hydrogen line survey of M31
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1980A%26AS...40..215C>
8. Local Standard of Rest (LSR) – Wikipedia
https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9férentiel_au_repos_local
9. Laboratoire de radioastronomie millimétrique OBSPM - Sensibilité radiométrique
<http://radiometrie.free.fr/I-A.htm>
10. Jean-Jacques Maintoux - F1EHN - page "radioastro"
<http://www.f1ehn.org>
11. Jean-Jacques Maintoux - F1EHN - Présentation pour la conférence RA Européenne EUCARA
http://f1ehn.pagesperso-orange.fr/pages_radioastro/Images_Docs/M31&M33_21cm_survey_slides.pdf