

Une étude de la répartition de la masse stellaire dans la voie lactée et une déduction de la présence de matière noire

Darius Foodei, Philippe Drompt, Gymnase Français de Bienne, darius.foodei@gmail.com.
philippe.drompt@gfbienne.ch, 2019 – 2020.



Figure 1 : Le NSRT de l'Université de Berne

Abstract

Ce travail a consisté à suggérer des méthodes pour réaffirmer la présence de matière noire dans le halo galactique de la Voie Lactée en démontrant la non-uniformité de la masse de notre galaxie par l'intermédiaire de différentes approches. Notre galaxie était précédemment considérée uniforme au niveau de sa masse. On pensait donc retrouver des courbes de rotation identiques à un système planétaire où la vitesse de rotation d'un objet diminuerait au fur et à mesure que son rayon galactocentrique deviendrait grand. A travers différentes méthodes théoriques et expérimentales, dont des observations grâce au radiotélescope de l'Université de Berne, nous avons cherché à montrer qu'en réalité il n'en était pas ainsi et que les propriétés dynamiques des objets tournant autour du centre de notre galaxie se comportaient différemment de ce que l'on pensait initialement. Ces observations ont ensuite conduit à poser l'hypothèse de l'existence de la matière noire pour expliquer ce phénomène. Cet article s'inscrit dans la continuité du travail de maturité qui a fait partie de la compétition nationale de science en Suisse : « Science et Jeunesse 2020 ». Le titre du présent article reprend donc le titre de ce travail.

Problématique

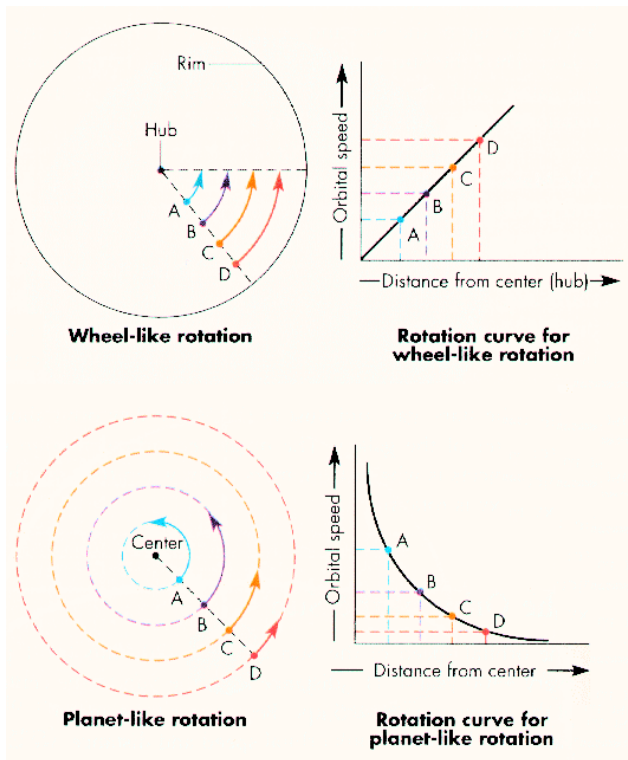


Figure 2 : Représentation des rotations différentielles dans la voie lactée. Sur la figure 6, on peut constater une combinaison des deux approches sur la courbe bleue.

La voie lactée est une structure très complexe qui n'est donc pas nécessairement très simple à étudier car nous nous situons à l'intérieur. Le but de notre travail était de mesurer les vitesses orbitales d'objets à des rayons galactocentriques différents pour en tirer des courbes de rotations qui nous donneraient une idée de la structure et de la densité de la Voie Lactée. À travers ces différentes méthodes, nous avons cherché à mettre en évidence des anomalies gravitationnelles qui pourraient être expliquées par l'existence de la matière noire.

Méthode

La méthodologie utilisée consistait à comparer des courbes de rotation issues de différentes approches théoriques et expérimentales sur un seul graphique. En ce qui concerne les trois approches théoriques, nous avons décidé de nous intéresser aux lois de Newton et aux lois de Kepler concernant le système solaire et de les appliquer à notre galaxie. Nous avons ensuite considéré que la voie lactée possédait une masse et une densité uniformes avec des approches qui cherchaient à calculer la masse surfacique et volumique de la galaxie. Concernant l'approche expérimentale, le NSRT de Berne est un radiotélescope qui mesure 4m de diamètre pour observer les émissions radio de gaz HI provenant de notre Voie Lactée. Il va de soi qu'avec une résolution comme celle-ci, on ne s'intéresserait qu'à des amas d'étoiles ou des nuages de gaz plus éloignés et non pas à des objets singuliers. Cela nous suffit néanmoins largement pour obtenir une courbe de rotation correcte. L'onde radio utilisée est celle de l'hydrogène neutre. Les atomes d'hydrogène neutres (HI) sont abondants et omniprésents dans les régions à faible densité du milieu interstellaire et stellaire. Ils sont détectables dans la ligne hyperfine de 21 cm où $\lambda = 1.420$ GHz. Deux niveaux d'énergie résultent de l'interaction magnétique entre l'électron et les spins de protons. Lorsque les spins relatifs s'inversent, un photon est émis à travers un retournement de spin. En mesurant les variations de fréquences grâce au décalage Doppler comme on peut le voir avec l'axe y de la figure 5, on a pu en déterminer les vitesses des objets respectifs. Les observations s'appliquent aussi à la lumière car comme confirmée par l'expérience des doubles fentes, la lumière se propage également comme une onde. La lumière visible est un spectre de couleurs, comme chacun a pu l'observer en regardant un arc-en-ciel. Lorsqu'un objet s'éloigne de nous, la

lumière se déplace vers l'extrémité rouge du spectre, à mesure que ses longueurs d'ondes s'allongent. Si un objet se rapproche, la lumière émise se déplace vers l'extrémité bleue du spectre, car ces longueurs d'ondes deviennent alors plus courtes, d'où les termes de Redshift et de Blueshift. Ce concept est la clé de l'expansion de l'univers et aussi de la radioastronomie. La loi de Hubble est une loi stipulant que les décalages vers le rouge dans les spectres des galaxies lointaines (et donc leur vitesse de récession) sont proportionnels à leur distance et que les objets observés dans l'espace lointain - espace extragalactique, 10 mégaparsecs (Mpc) ou plus - présentent un décalage vers le rouge, interprété comme une vitesse relative à l'écart de la Terre. C'est notamment grâce à ce Redshift que Edwin Hubble a réussi à comprendre en 1929 que les galaxies lointaines

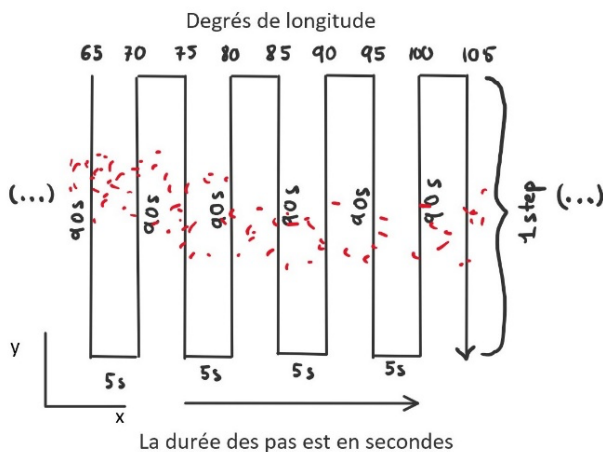


Figure 3 : Représentation du scan radio où on peut observer les pas progressifs effectués par le radiotélescope. Les pointillés rouges dans l'arrière-plan représentent la voie lactée longitudinalement comme perçue par le radiotélescope.

s'éloignaient de nous et que l'univers était en constante expansion. La mesure de ces légers changements de la fréquence de la lumière permet aux astronomes de mesurer la vitesse de tout ce qui se trouve dans l'univers. C'est ce à quoi nous nous sommes en partie intéressés dans ce Travail de Maturité.

Ces concepts s'appliquent directement à la radioastronomie et à ce travail. C'est en effet en mesurant les vitesses d'éloignement des objets avec ces différences en longueurs d'ondes et en utilisant la trigonométrie (qui prend en compte à la fois la terre, notre emplacement dans la galaxie ainsi que la place de l'objet observé) que l'on arrive à en déduire les vitesses de rotation et le rayon galactocentrique de ces objets. Cela nous permet donc d'en déduire une courbe de rotation qui ne pourrait pas être prédite avec des méthodes classiques théoriques.

Il faut néanmoins ne pas confondre ces deux phénomènes et donc appliquer les mêmes règles à la lumière qu'aux vibrations sonores. Einstein décrit dans la théorie de la relativité restreinte que la vitesse de la lumière est constante. Prenons un exemple très classique : un brigand se tient sur un train avançant à 50 km/h. Deux policiers tirent sur lui de différents endroits avec des balles se déplaçant à 100 km/h dans la direction où le train avance. Le premier policier tire sa balle d'un wagon situé à l'arrière du train donc sa balle percute le brigand à 100 km/h à cause de l'inertie. Le deuxième policier tire sa balle alors qu'il se tient sur une tour statique à côté du train. La vitesse de la balle percute donc le brigand à $100 - 50$ km/h, soit 50 km/h. Imaginons maintenant que les policiers tirent des balles qui se déplacent à la vitesse de la lumière c (la constante de la vitesse de la lumière = 300000 km/s). La relativité d'Einstein énonce que la vitesse de la lumière c est constante. Les balles des policiers percuteront donc le brigand en même temps et à la même vitesse c , peu importe la vitesse du train et les emplacements des policiers. « Ceci est dû au fait que la vitesse de la lumière reste constante quel que soit le cadre de référence inertiel, c'est-à-dire dans les cadres de référence non accélérés ».

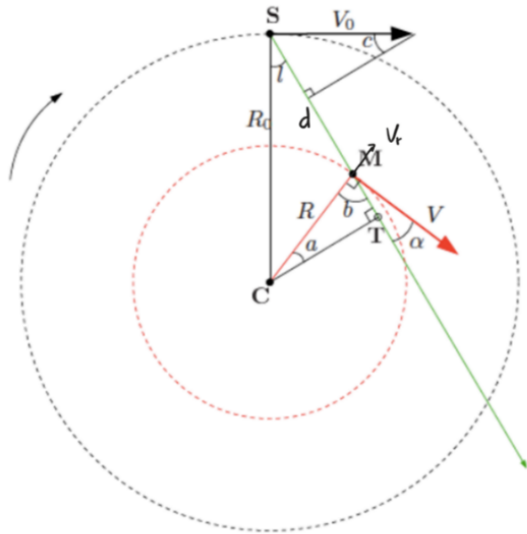


Figure 4 : Représentation simplifiée d'un système galactique et des points différents ainsi que leurs vecteurs respectifs qui nous intéresse pour la méthode des points tangents.

Dans cette figure est représentée la méthode des points tangents sans les formules trigonométriques. Cela nous a permis de prendre en compte la rotation du soleil autour du centre galactique ainsi que le mouvement des objets observés relatif à la Terre et plus précisément au télescope qui est situé sur la terre qui tourne autour du soleil (cette dernière contrainte est calculée automatiquement par Matlab donc on se limitera au soleil). Cette procédure est nécessaire car nous sommes liés à une contrainte importante : nous n'observons en effet pas ces astres de l'extérieur de la voie lactée mais dans un de ses bras.

Résultats

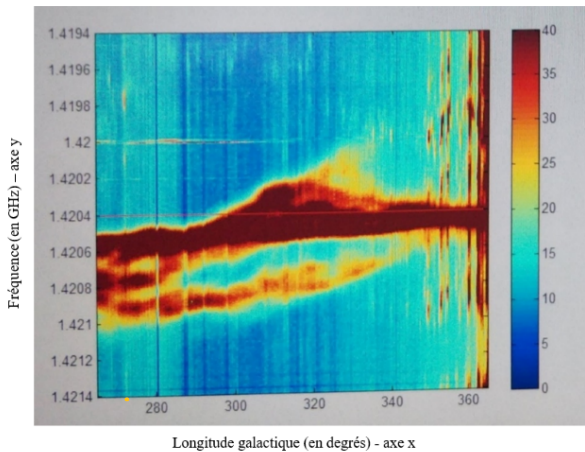


Figure 5 : Une représentation des données brutes obtenues après une manipulation Matlab des valeurs numériques.

Les résultats bruts auxquels nous avons été confrontés étaient des graphes x/y comme sur la figure 5. Pour pouvoir correctement interpréter ce graphe, nous avons utilisé les extrêmes de shift Doppler en plaçant des points sur les hauts et les bas de la partie rouge pour pouvoir ensuite en déterminer les vitesses d'éloignement etc dans Excel. Avant de pouvoir obtenir une courbe de rotation avec les données radio, il a donc fallu appliquer la méthode des points tangents pour ensuite pouvoir faire les manipulations Excel nécessaires et ce, afin de finalement obtenir une courbe de rotation représentative de ce que nous cherchions à démontrer (courbe bleue, figure 6).

Comme on peut le constater, les courbes issues de la théorie et celle mesurée avec le NSRT sont très différentes. On observe que sur la courbe théorique 1, les vitesses diminuent lorsque la distance augmente

comme le prédit Kepler avec son modèle planétaire. Sur les courbes 2, masse volumique et 3, masse surfacique, on note une croissance constante à cause de la masse qui est considérée uniforme à travers le système. Si on considère les courbes théoriques, on pourrait quand même dire que celles possédant les plus grandes similarités avec ce que l'on connaît actuellement de la matière noire sont bien les courbes 2 et 3 car on observe cette augmentation plutôt constante au niveau de la vitesse au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Cela pourrait nous conduire à nous interroger sur la présence de matière noire dans le halo, responsable pour des vitesses élevées à plus de 8 kpc. Lorsqu'on regarde la courbe mesurée avec le NSRT, on constate que les vitesses augmentent puis restent constantes au fur et à mesure que la distance s'accroît. D'après les lois de Kepler, afin d'avoir de tels effets sur les étoiles à plus de 8 kpc du centre, il faudrait qu'il existe encore de la matière à l'extérieur de la voie lactée. Néanmoins, à notre connaissance, on ne constate aucun gros amas d'étoiles ou de galaxie (à part pour les nuages de Magellan et certains amas globulaires qui ne sont pas assez massifs pour avoir des effets gravitationnels sur les étoiles intérieures) à proximité de la nôtre afin d'avoir des effets gravitationnels significatifs sur les masses visibles aux extrémités de la voie lactée. Cette augmentation et ces vitesses constantes de rotation des masses externes semblent être une preuve plausible qu'il existerait bel et bien de la matière invisible dans le halo à proximité de notre galaxie. Cette dernière provoque en effet d'énormes effets gravitationnels sur les étoiles de la voie lactée. En comparant nos résultats avec une étude conduite par divers instituts (<https://arxiv.org/abs/1810.02131> - Rotation curve of the Milky Way from Classical Cepheids) nous pouvons constater que nous obtenons des données très similaires avec une croissance au début suivie d'une stabilisation constante par la suite au fur et à mesure que le rayon augmente. L'étude mise en comparaison a été conduite pour un rayon encore plus grand, jusqu'à 20 kpc.

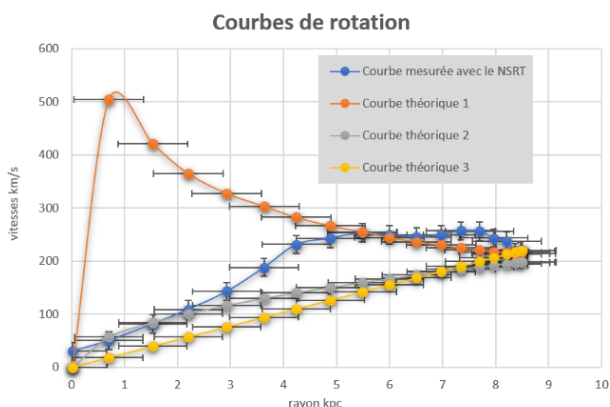


Figure 6 : Graphe mettant en commun les différentes courbes de rotation.
 Courbe théorique 1 : masse totale concentrée au centre galactique ;
 courbe théorique 2 : masse surfacique ;
 courbe théorique 3 : masse volumique

Discussion

Lorsque les résultats ont été comparés avec des données du satellite Gaia, ils sont apparus très significatifs et similaires. Les courbes se sont comportées de la même manière en ce qui concerne les vitesses orbitales des objets observés. Ceci nous a permis de proposer la matière noire hypothétique comme une façon d'expliquer ces anomalies.

Conclusion

D'après Kepler, afin d'avoir de tels effets sur les vitesses des étoiles à plus de 8 kpc du centre, il faudrait qu'il existe encore de la matière visible à l'extérieur de la voie lactée. Néanmoins, on n'observe aucun gros amas de masse à proximité de la nôtre afin d'avoir des effets gravitationnels aussi significatifs sur les masses visibles aux extrémités de la voie lactée. D'après les résultats obtenus, cette augmentation et ces vitesses constantes de rotation des masses pourraient être expliqués par le fait qu'il existerait bel et bien de la matière invisible dans le halo à proximité de notre galaxie. Cette dernière pourrait provoquer d'énormes effets gravitationnels sur les étoiles de la Voie Lactée.