

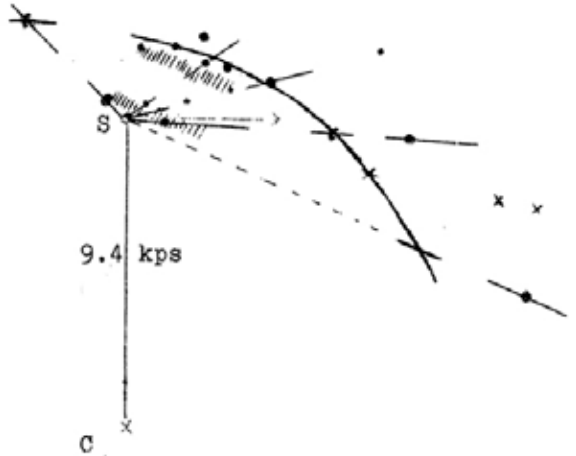
La raie 21 cm et la Voie lactée

C'est au début des années 50 que W.W. Morgan et ses collaborateurs ont apporté les premières preuves observationnelles de la structure spirale de la Voie lactée. La répartition de régions HII ionisées par des étoiles chaudes décrivait une portion de bras de 4000 parsecs de long inclinée à 25° sur un cercle tracé autour du centre de la galaxie ; un autre bras, parallèle au premier se trouvait 2000 parsecs plus loin.

La difficulté des mesures dans le domaine optique provient de l'absorption interstellaire due aux poussières du plan galactique. La raie de l'hydrogène neutre, de 21 cm de longueur d'onde, est à l'abri de ce problème. On peut la voir jusqu'à très loin. En mesurant sa vitesse radiale par l'effet Doppler, on peut estimer sa distance dès que l'on connaît la façon dont tourne le plan galactique. Si la ligne de visée traverse plusieurs bras, on voit des composantes de la raie affectées d'écarts Doppler variés. On peut dire que le profil de la raie en fonction de la longueur d'onde reflète la section de la Galaxie le long de la ligne de visée.

Le potentiel de la raie HI pour l'étude de la Galaxie avait été entrevu dès 1944, lorsque H.C. van de Hulst montra les propriétés de cette raie résultant d'une transition de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène.

Des réflecteurs radar de Würzburg utilisés près des côtes par l'armée allemande pendant la guerre avait été apportés à une station d'émission radio de Kootwijk, aux Pays-Bas. L'un d'entre eux, de 7 m 50 de diamètre, a été mis à la disposition des scientifiques pour des études sur le rayonnement radio galactique. C'est ainsi qu'en mai 1951, la raie 21 cm était détec-



Premières esquisses des bras de la Galaxie à partir des observations de l'hydrogène. (Oort, Muller, 1952)

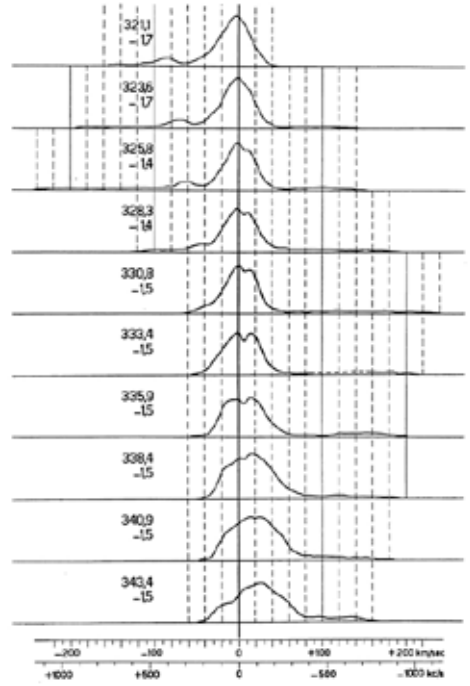
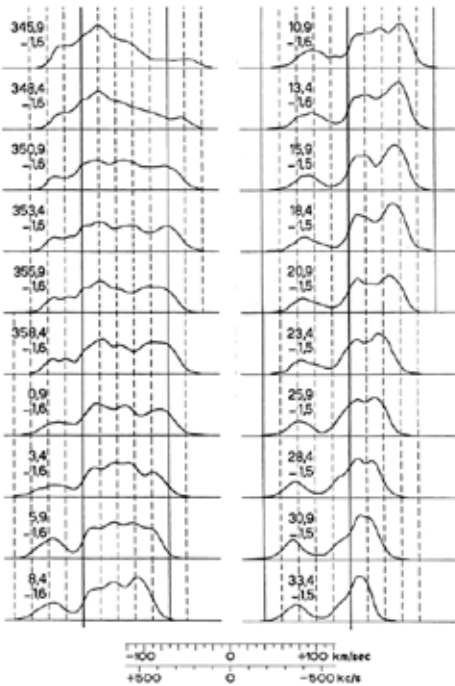
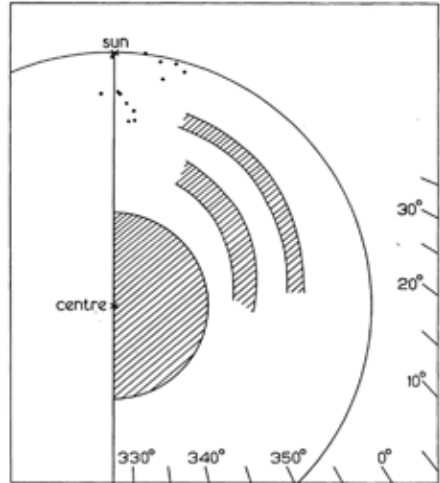


L'antenne Würzburg de Kootwijk utilisée pour l'une des premières détections de la raie HI 21 cm. D'un diamètre de 7 m 50 sa résolution spatiale était de l'ordre de 3°. (van Woerden et Strom, 2006)

tée. En fait, les hollandais C.A. Muller et J.H. Oort avaient été précédés de peu par H.I. Ewen et E.M. Purcell à Harvard qui avaient trouvé la raie le 25 mars 1951 grâce à une antenne cornet donnant une résolution de 12°, plus grossière que celle de 3° de l'antenne Würzburg.

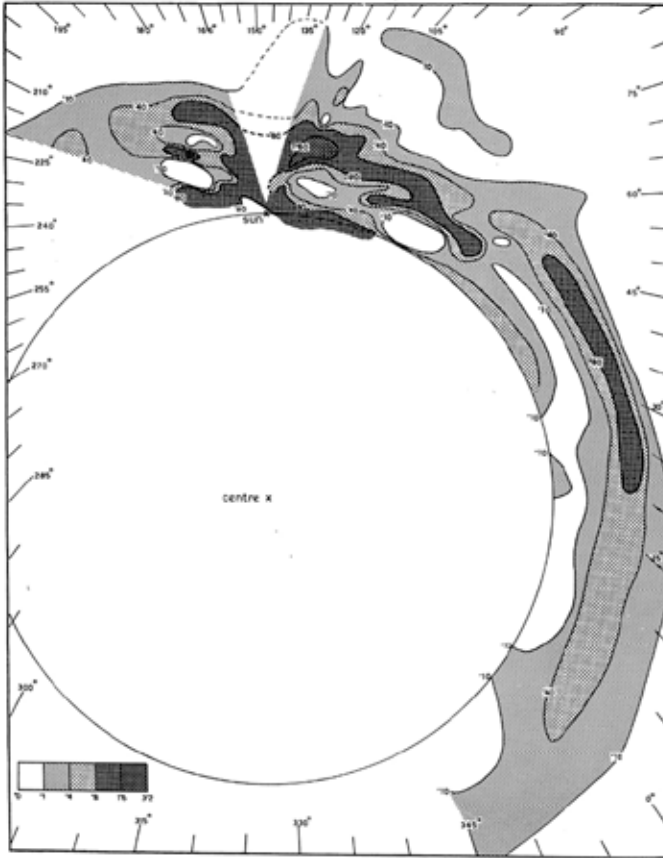
Les figures de cette page montrent quelques-uns des premiers profils obtenus et une carte grossière de la Voie Lactée que l'on a pu en déduire.

► *Ébauche d'une carte de la structure spirale des régions internes de la Galaxie. Les points près du Soleil représentent des groupes d'étoiles chaudes, observées dans le domaine optique, et ne permettant de tracer que des segments des bras spiraux les plus proches.* (Kwee et al, 1954)



Profils de la raie 21 cm de l'hydrogène près du centre galactique (à gauche) et plus à l'écart (à droite). Les profils dans la direction centrale sont étroits

et ne montrent pas de fortes vitesses radiales puisque les nuages se déplacent perpendiculairement à la ligne de visée. (Kwee et al, 1954)



Première cartographie des régions externes de la Galaxie. (van de Hulst et al, 1954)

Depuis ces premiers travaux, les techniques ont bien évolué, la résolution a fortement progressé et l'hydrogène n'est plus le seul traceur utilisé. La carte p. 614 donne un schéma global des bras tels qu'on les envisage de nos jours.

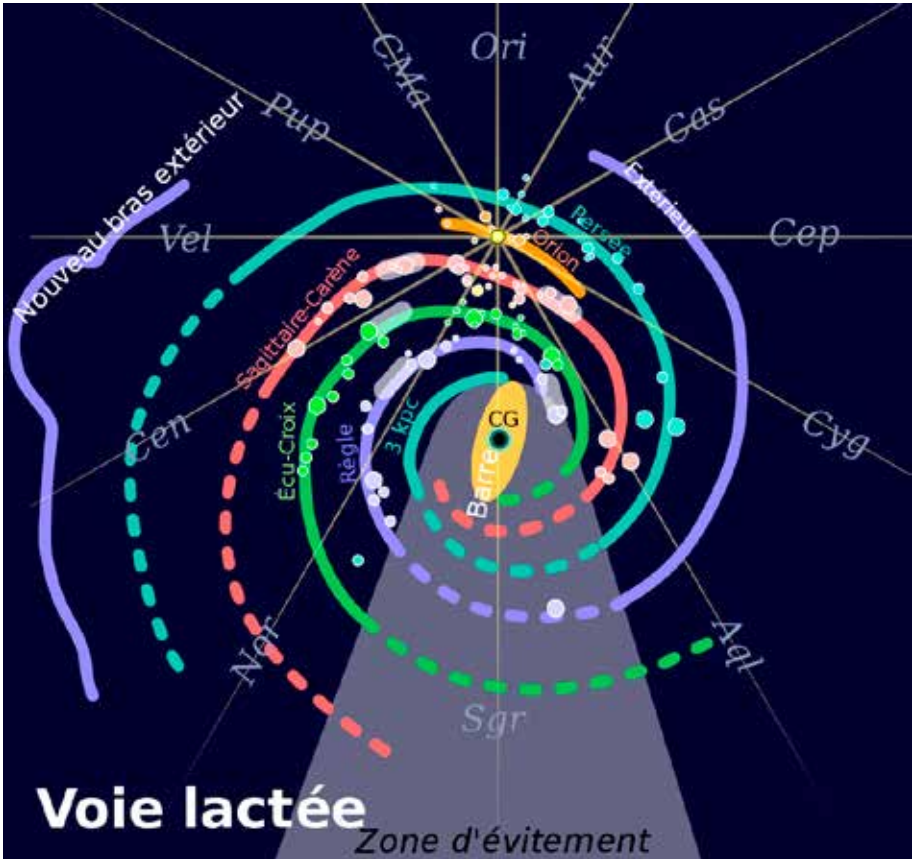
Origine de la raie à 21 cm

La raie de l'hydrogène atomique de longueur d'onde de 21 centimètres (raie HI) correspond à un changement de l'état énergétique de l'atome d'hydrogène neutre. Sa fréquence précise est de $\nu = 1420,405751767$ MHz, ce qui équivaut à une longueur d'onde dans le vide de $\lambda = 21,1061140542$ cm, les deux étant reliés

par $\lambda = c/\nu$ avec la vitesse de la lumière *décrite exacte* $c = 299\,792\,458$ m/s.

La raie HI provient de la transition d'un électron entre les deux niveaux (dits hyperfins) de l'état fondamental de l'hydrogène, niveaux qui sont séparés de 5,87433 microélectronvolts. La fréquence ν des photons ou quanta émis ou absorbés dans cette transition est donnée par la relation de Planck-Einstein $\nu = E/h$ où h est la constante de Planck $4,1357 \cdot 10^{-15}$ eV s.

Considérons un atome d'hydrogène dans son état fondamental, c'est-à-dire avec l'électron sur son orbite la plus basse. En plus de se déplacer autour du noyau (un proton), on

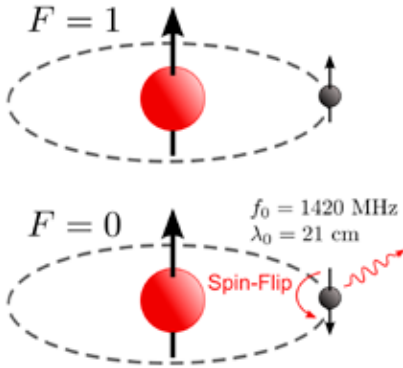


peut imaginer que l'électron unique de l'atome d'hydrogène est animé d'un mouvement de rotation sur lui-même bien déterminé, le spin. Il en va de même du proton. Le spin est en réalité une propriété strictement quantique sans équivalent en mécanique classique mais l'analogie est parlante et permet d'ailleurs d'aller plus loin. Il se fait que les axes de rotation du noyau et de l'électron sont toujours parallèles. La rotation des deux particules peut cependant se faire dans le même sens ou dans des sens opposés. Comme le proton et l'électron sont chargés électriquement, leur rotation crée un champ magnétique, les deux particules sont ainsi des aimants qui peuvent avoir la même

Carte schématique actuelle de la Voie lactée, réalisée en grande partie à l'aide de mesures de la raie à 21 cm de l'hydrogène. Les bras représentés en pointillés sont des extrapolations. (Rursus ; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Milky_Way_Arms.svg)

orientation (les pôles de même nom du même côté) ou non (les pôles nord en face des pôles sud). Lorsque l'électron et le proton ont des spins parallèles, l'énergie de l'électron est très légèrement supérieure au cas où les spins sont antiparallèles. Cette petite différence d'énergie fait la structure hyperfine du niveau – cela par

Les spins dans l'atome d'hydrogène.
(Tiltec ; wikipedia)



opposition aux différents états correspondant à des orbites de plus en plus élevées et qui ont des différences d'énergie bien plus grandes, comme celle donnant les raies optiques bien connues des astrophotographes (par exemple H-alpha ou H-bêta). Tout comme l'émission de ces raies, celle de la raie HI est due à la transition entre les deux sous-niveaux. La différence est que l'énergie est beaucoup plus faible. La probabilité que cette transition se produise est aussi extraordinairement faible. Un atome d'hydrogène où l'électron est dans le sous-niveau supérieur est en fait très stable. Il met des millions d'années avant de tomber spontanément au sous-niveau inférieur. Mais l'hydrogène est si abondant dans l'Univers que cette transition est suffisamment fréquente pour que la raie ait une intensité observable.

Des collisions entre atomes d'hydrogène peuvent favoriser cette transition, comme elles peuvent aussi ré-exciter un atome tombé dans le niveau inférieur.

Ce domaine de longueur d'onde est d'un grand intérêt pour les astronomes car il n'est

pas absorbé par les nuages de poussière et permet de pénétrer au cœur d'objets qui sont opaques dans le domaine optique, comme les nuages interstellaires qui abondent dans le plan de la Galaxie.

La mesure des vitesses de nuages d'hydrogène avec cette raie a permis de tracer la carte des bras spiraux de notre galaxie, mais son usage est bien plus varié.

Les observations de la raie de l'hydrogène ont également été utilisées pour étudier la dynamique de galaxies autres que la nôtre, pour calculer la masse de galaxies et évaluer l'importance de la matière noire, pour trouver des enveloppes d'anciennes supernovæ ou encore pour tester la variabilité de la constante universelle de la gravitation au cours du temps. En cosmologie la raie HI est la seule façon de sonder l'« âge sombre » précédant la réionisation du cosmos. En tenant compte du redshift, la raie émise à cette époque apparaît à des fréquences beaucoup plus basses, entre 200 MHz et 9 MHz.

Les observations à 21 cm sont très délicates. Le faible signal est perturbé par les interférences diverses et ces observations doivent donc être réalisées à partir de sites très isolés, en prenant soin d'éliminer les interférences terrestres. Comme sites idéaux, on propose entre autres la face cachée de la Lune.

On est bien loin des premières expériences réalisées à la station de radio hollandaise, en présence d'émetteurs radio de grandes puissances.

Une représentation symbolique de la transition hyperfine de l'hydrogène a été gravée sur une plaquette embarquée dans les sondes spatiales Voyager et Pioneer. La fréquence de la transition est censée permettre à des extraterrestres de décoder d'autres informations inscrites sur la plaquette.

