

Radioastronomie, notions de base

Pierre Causeret, Jean-Michel Vienney

Après la lunette astronomique de Galilée et le télescope de Newton qui observent dans le visible, la radio-astronomie a permis d'ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

Rapide historique

Aux alentours de 1870, Maxwell interprète les ondes lumineuses comme une oscillation du champ électromagnétique. Il suggère que ce rayonnement existe à d'autres longueurs d'onde que le rayonnement visible, infrarouge ou ultraviolet.

Dans les années 1880, Hertz montre l'existence des ondes radio dont la longueur d'onde est un million de fois plus grande que celle de la lumière visible.

La communication radio se développe alors, en particulier pendant la première guerre mondiale.

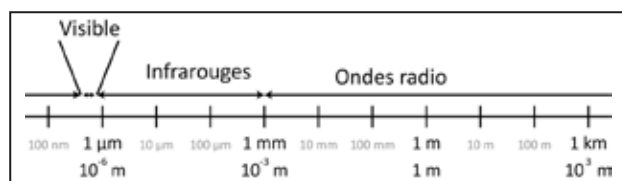
En 1933, Karl Janski, ingénieur de la société Bell, capte un signal provenant du centre de notre Galaxie.

Quelques années plus tard, un astronome amateur américain, Grote Reber, construit le premier radiotélescope.

Lors de la deuxième guerre mondiale, on améliore les techniques de communication radio et les radars. On découvre par exemple que le Soleil émet aussi des ondes radio.

La radioastronomie se développe réellement à partir des années 50 avec la construction de radiotélescopes de plus en plus grands.

Ondes radio et longueur d'onde



La longueur d'onde de la lumière visible est comprise entre 400 et 800 nm. Pour les ondes radio, on va de 1 millimètre à plusieurs kilomètres... L'échelle du schéma ci-dessus est logarithmique (longueur d'onde multipliée par 10 quand on passe d'un trait au suivant).

On indique souvent la fréquence f d'une onde radio en hertz. Il s'agit du nombre d'oscillations par seconde, c'est l'inverse de la période T :

$$f = 1/T$$

Par exemple, une onde radio de 1 kHz (1 000 Hz) oscille 1000 fois par seconde, sa période est de 1/1000 s.

Quant à la longueur d'onde λ c'est la distance parcourue par l'onde en une période à la vitesse de la lumière c .

$$\text{On a donc : } \lambda = c \times T = c/f$$

Ce que l'on peut aussi écrire $f \times \lambda = c$ ou $f = c/\lambda$.

Une longueur d'onde de 1 décamètre correspond à une fréquence $f = 3 \times 10^8 \text{ m} / 10 \text{ m}$ soit $3 \times 10^7 \text{ Hz}$ soit 30 MHz.

Voici par exemple une correspondance entre longueur d'onde et fréquence :

Longueur d'onde	1 mm	1 dam	1 m	1 km
Fréquence	300 GHz	3 GHz	300 MHz	300 kHz

On parle couramment d'onde millimétrique, centimétrique, décimétrique, kilométrique...

Puissance et énergie, et résolution spectrale

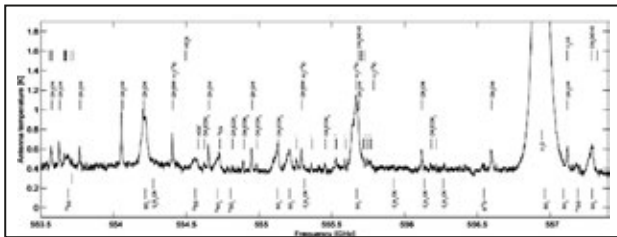
On s'intéresse à la densité spectrale de flux, puissance (en W) reçue par unité de surface (en m^2) dans une bande de fréquence donnée (en Hz). Elle est en général tellement faible que pour l'exprimer les radioastronomes utilisent une unité particulière, le Jansky (Jy) : $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Pour le Soleil, elle est de l'ordre de 50 000 Jy, mais pour la plupart des radiosources elle est plutôt de l'ordre de 1 Jy.

Dans le domaine visible, l'énergie associée à un photon est de l'ordre de l'électronvolt, et correspond à l'énergie associée à la transition entre les niveaux électroniques de l'atome. Dans le domaine radio cette énergie, beaucoup plus faible, est plutôt reliée aux niveaux de vibration et de rotation des molécules.

C'est ainsi que l'étude des spectres radio a permis de détecter dans le milieu interstellaire la présence de

très nombreuses molécules, parfois relativement complexes comme le méthanol (CH_3OH autour de 12,18 GHz) ou le formaldéhyde H_2CO (14,49 GHz) jusqu'à l'aminocétonitrile $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$, précurseur de la glycine $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, le plus simple des acides aminés.



Spectre avec de nombreuses raies moléculaires.

La résolution spectrale des radiotélescopes est telle qu'ils permettent en plus de déterminer avec une très grande précision les vitesses radiales par effet Doppler.

Les antennes des radiotélescopes

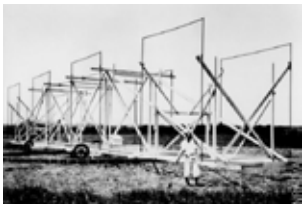
Un instrument est construit pour observer dans un certain domaine de longueur d'onde. Or la taille caractéristique du détecteur élémentaire d'un radiotélescope est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du signal qu'il doit recevoir. La très grande étendue spectrale du domaine radio a conduit à construire des antennes de formes très variées : du simple fil tendu entre des mâts (domaine des ondes kilométriques) ou bobiné sur un cadre de manière plus sophistiquée, au cornet relié à un guide d'ondes (domaines centimétrique à submillimétrique) en passant par le classique dipôle des antennes UHF « Yagi » (les mêmes que celles qui nous permettent de recevoir la TV).



Cornets guides d'onde.



Antenne UHF Yagi.



Antennes de Jansky.



Radiohéliographe de Nançay.

Comme dans le domaine optique, l'énergie est d'abord « concentrée » à l'aide d'une combinaison de surfaces collectrices, souvent paraboliques.

Les écarts à la forme idéale de ces surfaces doivent être inférieurs à $\lambda/10$ (le dixième de la longueur d'onde). Si dans le domaine visible, cela demande des miroirs polis avec une précision de quelques dizaines de nanomètres, pour un radiotélescope observant dans le domaine centimétrique les principaux défauts du miroir ne doivent pas dépasser le millimètre (pour un miroir dont les dimensions peuvent, comme à Nançay ou Arecibo atteindre plusieurs centaines de mètres).

Le maillage du miroir télescope doit quant à lui être inférieur à la longueur d'onde observée : toujours à Nançay, le miroir est un grillage dont les mailles mesurent environ 1 cm de côté.

La résolution spatiale d'un instrument est d'autant meilleure que la longueur d'onde observée est courte et que le diamètre du miroir est grand.

Un radiotélescope de 25 m de diamètre observant à 21 cm de longueur d'onde a une résolution spatiale de $0,5^\circ$, le diamètre de la Lune, ce qui n'est pas précis pour associer une source radio à un objet visible par exemple. Il a donc fallu construire des radiotélescopes les plus grands possibles. Celui d'Arecibo, à Porto Rico, mesure 305 m de diamètre.

Une autre solution pour améliorer la résolution spatiale est de combiner les signaux reçus par plusieurs antennes éloignées. C'est l'interférométrie, utilisée par exemple sur le plateau de Bure dans les Alpes, mais aussi à l'échelle de la planète. La technologie actuelle, permet en effet de numériser et dater les signaux reçus avec assez de précision pour combiner des signaux acquis par des antennes distantes de plusieurs milliers de kilomètres.

Principales radiosources

En vertu de la loi de Wien, qui associe la longueur d'onde du maximum d'émission d'une source en équilibre thermique à sa température, le domaine radio donne accès à l'Univers froid : nuages de gaz et de poussières interstellaire et intergalactiques.

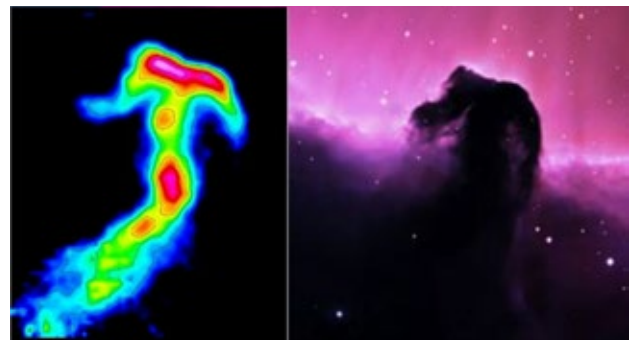
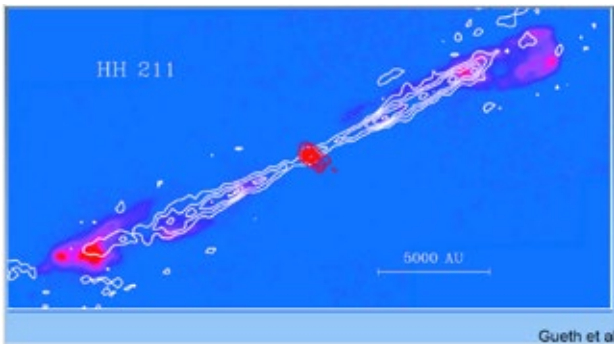


Image radio de IC434 avec la nébuleuse obscure de la Tête de Cheval.

C'est ainsi qu'il est possible de tracer la distribution du gaz et des poussières, d'étudier la rotation des galaxies bien au-delà de leur partie visible ou de suivre la rotation de disques protoplanétaires.

Mais pour de nombreuses sources, l'intensité de l'émission dans le domaine radio ne peut s'expliquer que par d'autres mécanismes. On peut citer l'émission synchrotron par les jets électro-niques relativistes émis par certains noyaux actifs de galaxies, ou soumis à des champs magnétiques très intenses comme dans le cas des pulsars, étoiles à neutrons en rotation rapide.



Émission synchrotron par des jets d'électrons relativistes.

Mais toutes les étoiles émettent aussi en radio. Le Soleil, par exemple, a son maximum d'émission dans le visible, mais on trouve dans son spectre toutes les fréquences, et en particulier des fréquences radio.

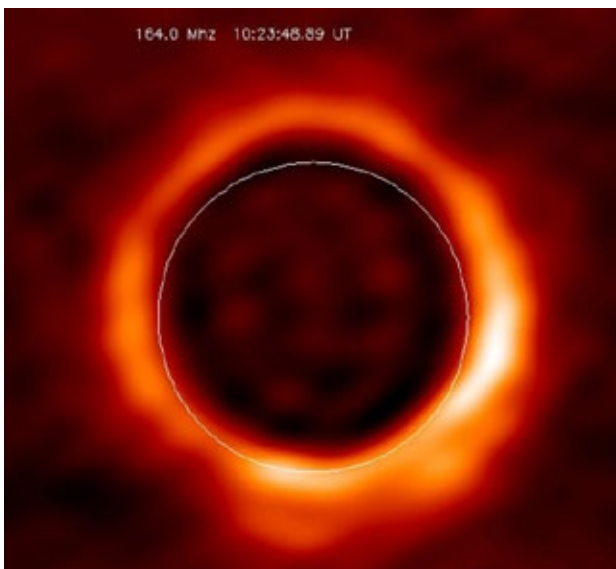


Image du Soleil à 164 MHz (Nançay).

Dans le Système solaire, les radioastronomes suivent aussi assidûment l'émission des planètes, en particulier Jupiter dont l'émission est si intense qu'elle est accessible aux amateurs, mais aussi les queues cométaires : on a ainsi accès à leur composition, ainsi qu'à la vitesse des particules et à l'intensité du champ magnétique local.

C'est aussi dans le domaine radio que Jocelyn Bell a découvert en 1967 le premier pulsar qui fut ensuite associé à une étoile à neutrons en rotation rapide.

La période de rotation de ces derniers est si stable qu'on a un temps pensé à les utiliser comme étalons de mesure du temps.

Les images des radiotélescopes

En « scannant » une région du ciel il est possible, comme dans le domaine visible, de reconstruire des images traduisant simplement l'intensité du signal par une variation de niveau de gris ou de couleur, ou plus simplement par le tracé d'isocontours analogues aux isobares de nos cartes météorologiques.

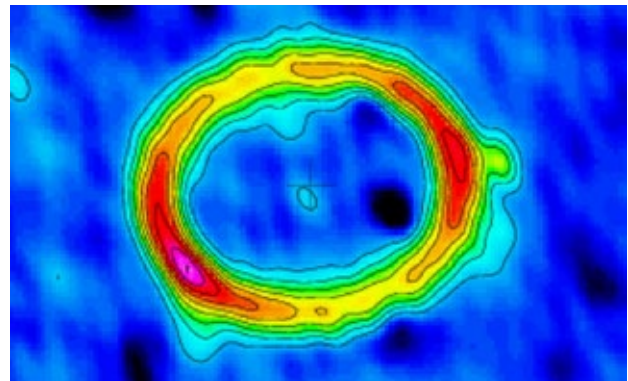


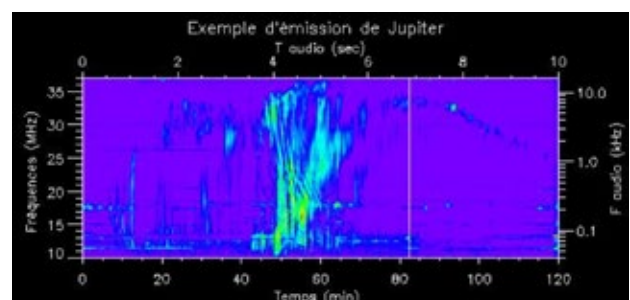
Image d'un disque protoplanétaire (CG Tau).

Les images publiées peuvent traduire des résultats obtenus après des traitements très sophistiqués. Par exemple l'image peut représenter des variations de vitesse mesurées par l'effet Doppler. L'échelle colorée ou les isocontours traduisent alors la valeur de la vitesse du gaz, parfois corrigée de divers effets de projection (voir par exemple l'image de UY Aur page 9).

On peut aussi chercher à traduire la répartition de la concentration d'une espèce chimique.

Une image peut aussi représenter l'évolution d'un phénomène au cours du temps. On construit alors un spectrogramme dans lequel le temps apparaît en abscisses, la fréquence en ordonnées, et où l'intensité est représentée par une échelle de niveaux de gris ou de couleurs (voir figure 7 page 24).

Certains ont même parfois fait appel à notre ouïe en transposant dans le domaine audible (de 20 Hz à 20 kHz) les données obtenues dans des domaines de fréquence très différents.



Spectre dynamique converti en son (P. Zarka, C. Briand) sur <https://www.obs-nancay.fr/La-radioastronomie-280.html>.