

Les enjeux des fréquences pour la radioastronomie

Par Ivan THOMAS

et Karl-Ludwig KLEIN

Observatoire de Paris, Station de radioastronomie de Nançay, PSL, CNRS, OSUC, Université d'Orléans

Introduction

L'atmosphère et l'ionosphère de la Terre sont transparentes aux ondes électromagnétiques de 10 MHz à quelques dizaines de Gigahertz (GHz) et pour certaines fréquences jusqu'à quelques Terahertz (THz). C'est dans la première moitié du XX^e siècle, et en particulier durant la Seconde Guerre mondiale, que l'on réalisa l'apport de cette nouvelle fenêtre sur l'Univers nous permettant d'en étudier des aspects très différents de l'observation traditionnelle en lumière visible. Dans cet article nous donnons un aperçu de ce que la radioastronomie apporte à la recherche scientifique et, de façon connexe, au développement technologique, ainsi que des contraintes importantes auxquelles elle doit faire face.

Qu'est-ce que la radioastronomie ?

Le ciel du radioastronome ne ressemble guère au ciel étoilé que nous voyons à l'œil nu. Nuages de gaz, étoiles éteintes (en lumière visible), galaxies, l'univers dans son ensemble... : la radioastronomie a contribué à changer notre regard sur notre environnement cosmique.

Parmi les objets du système solaire, le Soleil est la source dominante. Au-dessus de sa couche visible en optique, les ondes radio permettent d'observer son atmosphère beaucoup plus dynamique, avec des éruptions et éjections de masse (Figure 1). L'observation radio d'émissions non thermiques, produites par les mouvements d'électrons dans les magnétosphères de Jupiter et Saturne, nous permet d'explorer les champs magnétiques et l'interaction entre une planète et ses satellites. Le

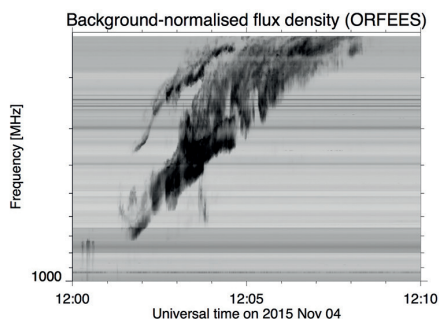


Figure 1 : A gauche, spectre dynamique de l'émission radio d'une onde de choc dans la couronne solaire. L'axe vertical montre la fréquence, entre 1 GHz (bas) et 140 MHz. Le flux reçu est d'autant plus élevé que la couleur est sombre. La dérive des hautes vers les basses fréquences traduit le mouvement de l'onde de choc de la basse vers la haute couronne. Les barres horizontales sont pour la plupart des résidus d'émetteurs terrestres. Observation : spectrographe ORFEES, station de radioastronomie de Nançay. A droite, réseau nord-sud des antennes du Radiohéliographe de Nançay, avec des paraboles de 5 m de diamètre. Le spectrographe ORFEES utilise une seule antenne du même type. © Observatoire de Paris, Station de radioastronomie de Nançay.

système solaire nous donne ainsi les outils pour chercher des planètes ailleurs et caractériser leur environnement spatial. Les émissions radio de raies spectrales émises par les comètes révèlent leur composition chimique, avec de nombreuses molécules observables uniquement en ondes millimétriques.

Contrairement à la lumière visible, les étoiles ordinaires ne sont pas les émetteurs radio les plus brillants. En revanche, des stades ultimes de l'évolution stellaire se révèlent au travers des observations radio. Les pulsars sont des étoiles condensées après leur phase de libération d'énergie par fusion nucléaire, rotateurs rapides dont la réception périodique de signaux nous fournit des mesures précises des astres eux-mêmes (Figure 2) et de l'espace que les ondes radio parcourent. La surveillance sur de nombreuses années est un outil précieux pour la future détection d'ondes gravitationnelles.

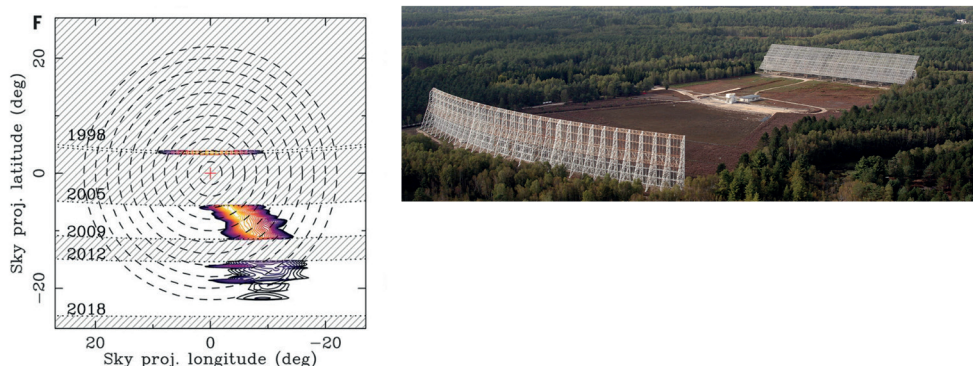


Figure 2 : A gauche, cartographie de l'émission radio d'un pulsar, faite sur la base de l'analyse de la polarisation des impulsions reçues par les radiotélescopes d'Arecibo et Nançay. L'émission se situe au-dessus d'un des pôles magnétiques de l'astre, indiqué par le signe plus au centre de la carte. D'après Desvignes et al., *Science* 365, 1013 (2019). Reproduit avec l'autorisation de l'AAAS. A droite, les miroirs mobile (arrière-plan) et fixe (avant-plan) du Radiotélescope décimétrique de Nançay. © Observatoire de Paris, Station de radioastronomie de Nançay.

À l'autre opposé de l'évolution stellaire, les observations en ondes millimétriques avec ALMA au Chili nous montrent les nuages de gaz dans les galaxies où se forment de nouvelles étoiles (Figure 3). Les observations ont aussi donné la meilleure image jamais obtenue d'un système planétaire en formation. Cette image révèle des condensations dans le disque de poussières et débris autour de la proto-étoile qui se contracte. Ces condensations sont les embryons des futures planètes. Ces observations produisent des contraintes inédites pour la théorie de la formation des planètes.

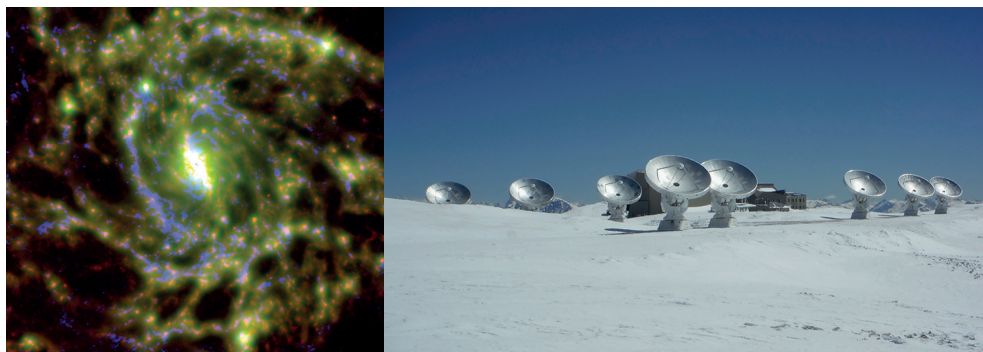


Figure 3 : A gauche, la galaxie spirale IC 342 dans la constellation Camelopardalis. Grâce à NOEMA, les scientifiques ont réussi à capturer une image d'une précision inégalée, montrant la distribution des nuages de poussière et donc les régions de formation d'étoiles actives dans la galaxie. © IRAM / A.Schruba / J.Pety, NASA / JPL-Caltech, NASA / JPL-Caltech / J.Turner. A droite, le réseau d'antennes NOEMA de l'IRAM sur le Plateau de Bure.

Depuis longtemps, l'observation de la raie à 21 cm (1,4 GHz) de l'hydrogène neutre et de son décalage Doppler en fonction de la vitesse radiale de l'émetteur est un traceur des mouvements d'astres lointains. Elle nous montre que la rotation des nuages autour du centre des galaxies ne se comporte pas comme Kepler et Newton le prédisent, sauf si une grande quantité de la matière dans l'Univers nous est invisible – une observation fondamentale pour établir l'idée de la matière noire, qui a ouvert une nouvelle branche de la recherche en astrophysique. La même technique nous permet de mesurer la vitesse apparente d'éloignement des galaxies qui traduit en fait l'expansion de l'Univers. Avec des décalages importants qui déplacent la raie de 1,4 GHz en dessous de 150 MHz, on cherche à identifier l'époque et la première signature de la formation des étoiles dans l'Univers, en mesurant la quantité d'hydrogène neutre en fonction du temps.

Les mouvements des astres autour du centre de notre galaxie font penser que ce centre est occupé par un trou noir géant, un objet constitué d'étoiles effondrées. En combinant des télescopes répartis sur la Terre, dont le télescope de 30 m de l'IRAM en Espagne qui était l'antenne la plus sensible du réseau, la radioastronomie a fourni la première image des environs d'un tel trou noir dans une autre galaxie. Cette image montre un anneau lumineux autour du trou noir, formé par l'émission de fond qui est focalisée par la gravitation du trou noir de plusieurs milliards de masses solaires.

Apports de la radioastronomie à la société

En dehors de la compréhension physique qui nous permet de connaître les contraintes que l'Univers impose sur notre vie, la radioastronomie a un apport direct aux activités technologiques et économiques humaines. C'est la faiblesse du signal recherché qui a conduit au développement de récepteurs à très faible température de bruit (jusqu'à 10 K), avec de nombreuses applications dans la gamme 10 MHz – 1 THz et au développement de systèmes d'analyse du spectre sur des bandes très larges. C'est aussi grâce à la radioastronomie que nous avons appris à maîtriser la radiométrie passive pour l'observation de la Terre et la mesure des paramètres géophysiques : température, composition de l'atmosphère, distribution de la vapeur d'eau... Ou encore les appareillages de détection médicale : thermographie du corps humain en ondes millimétriques, détection et localisation de tumeurs cancéreuses en ondes centimétriques, tomographie en rayons X. Les mesures de type interférométriques à longues bases (VLBI) et astrométriques permettent d'améliorer les référentiels de géolocalisation (dérive des continents, variation de la rotation terrestre, GNSS...).

L'activité solaire, sujet d'études scientifiques, affecte aussi la technologie, et en particulier la technologie embarquée sur satellite. Les perturbations des transmissions radio au travers de l'ionosphère terrestre ont des conséquences directes sur les communications HF et les systèmes GNSS. Les activités opérationnelles de surveillance qui commencent à être menées au sein de l'aviation civile internationale et des armées doivent s'appuyer sur des observations de surveillance du Soleil. Le spectre radio, particulièrement sensible aux perturbations solaires, fournit des données d'entrée. En France, la météorologie de l'espace fait partie d'une coopération entre radioastronomes et l'armée de l'air.

La radioastronomie nécessite des bandes de fréquences d'observation protégées

On peut identifier en radioastronomie les observations à spectre continu (continuum) et celles de raies spectrales. Les observations continuum permettent de mesurer précisément la distribution spectrale du rayonnement céleste. Elles nécessitent des bandes d'observation toutes les octaves à partir d'environ 10 MHz avec une largeur minimale de 2 %, idéalement de 10 %, de la fréquence

centrale. Les observations spectrales permettent d'identifier les espèces atomiques et moléculaires par leurs fréquences de transition en émission ou en absorption, puis de suivre leur mouvement dans l'Univers par leur décalage Doppler. Ces observations requièrent des fréquences protégées spécifiques avec des largeurs de bande du même ordre de grandeur que celles des observations continuum.

Les premières bandes du service de radioastronomie ont été initialement définies à l'UIT dans les années 1960, à une époque où la technologie, les récepteurs et les systèmes de communication étaient exclusivement analogiques avec des largeurs de bande instantanées faibles et avec un spectre radio peu dense et peu contraint. Les bandes de radioastronomie statutairement bien protégées (statut primaire) permettaient de garantir la qualité des observations et les bandes à protection moindre (statut secondaire ou notes) permettaient aussi d'y observer en fonction de leur taux d'utilisation réel par les autres services de radiocommunication. La montée progressive des fréquences d'observation a ensuite conduit à attribuer au service de radioastronomie un nombre notable de nouvelles bandes au-dessus de 76 GHz, lors de la conférence mondiale des radiocommunications en 2000. Les applications commencent à investir fortement les bandes millimétriques ; télécommunications mobiles (5G) et satellitaires jusqu'à 70 GHz, radiolocalisation au-delà de 70 GHz. Il est nécessaire de garantir la compatibilité de ces attributions avec les observatoires de radioastronomie millimétriques.

De fortes évolutions ont aussi eu lieu en dessous de 65 GHz : du côté scientifique, la montée en performance des instruments (sensibilité, largeurs de bande observées); du côté des autres services de radiocommunication, l'évolution vers les modulations numériques complexes à étalement de spectre associée à une densification de l'utilisation réelle des bandes de fréquence attribuées. Une évolution des tables de fréquences en faveur du service de radioastronomie serait nécessaire : élargissement des bandes protégées au-delà des 2 %, augmentation du niveau de protection de certaines bandes (par exemple sous 1,4 GHz), voire attribution de nouvelles bandes (par exemple sous 100 MHz). Un autre outil de compatibilité possible est de considérer des contraintes de fréquences plus fortes vis-à-vis des autres services, mais uniquement dans des zones réglementées autour des observatoires.

Les observatoires de radioastronomie sur le territoire métropolitain sont la station de radioastronomie de Nançay dans le Cher, pour les observations en dessous de 20 GHz, et l'observatoire millimétrique du plateau de Bure (NOEMA) dans les Hautes-Alpes pour les observations au-dessus de 20 GHz.

Des sensibilités extrêmement élevées et des critères associés contraignants

Les récepteurs de la radioastronomie peuvent mesurer les signaux reçus de sources dont la puissance peut être jusqu'à 1 million de fois plus faible que celle du bruit système provenant du récepteur, du sol et de l'atmosphère, au prix d'un moyennage sur des temps longs (jusqu'à des dizaines d'heures) et une très grande stabilité du récepteur. La radioastronomie est totalement dépendante du signal céleste naturel et incontrôlable, portant les caractéristiques des radiosources et toute la complexité de notre Univers au travers de son profil fréquentiel, sa dynamique, sa modulation, ses période et durée d'apparition et même de son existence, par exemple pour la recherche d'une vie extraterrestre ou les phénomènes transitoires. Les recommandations de l'UIT-R (RA.769, RA.1513) concernant les seuils de brouillages et le taux de perte de données admissibles pour la radioastronomie définissent ainsi des critères relativement contraignants pour les autres services de radiocommunications. Les émissions perturbatrices provenant des bandes adjacentes aux bandes d'observation de radioastronomie, et souvent captées par les lobes

secondaires des antennes des télescopes, sont les plus difficiles à identifier. Or, ces perturbations risquent d'augmenter avec la multiplication des réseaux de communication terrestres et des constellations satellitaires, l'explosion du nombre d'émetteurs en mouvement « à faible portée » (objets connectés, radars, drones...) et les effets d'agrégation de puissance. Il est devenu nécessaire de conserver autant que possible des bandes de garde et d'introduire les outils de compatibilité avec la radioastronomie dans les phases de normalisation des produits, en lien généralement avec la localisation des émetteurs par rapport aux sites de radioastronomie.

Conclusion

A une époque où l'astrophysique opère par des observations multi-longueurs d'onde et multi-messagers, la radioastronomie reste une technique originale. Elle a su surmonter, par la construction de grands interféromètres, jusqu'à des instruments intercontinentaux, l'inconvénient de la grande longueur d'onde qui est la faible résolution angulaire. Les grands interféromètres sont des instruments-clés. En Europe, LOFAR (cœur d'antennes aux Pays-Bas et antennes dans les pays périphériques dont la France) ouvre l'imagerie aux fréquences les plus basses observables depuis la Terre. Le nouvel interféromètre ALMA, au Chili, fait depuis quelques années des observations inédites en ondes millimétriques. L'avenir de la radioastronomie au sol est la construction du Square Kilometre Array (SKA), qui deviendra l'interféromètre le plus sensible en ondes centimétriques-métriques.

En France, la station de radioastronomie de Nançay en ondes centimétriques-métriques, avec son nouvel interféromètre NenuFAR, et l'interféromètre NOEMA de l'IRAM près de Gap, le plus sensible en ondes millimétriques dans l'hémisphère Nord, contribuent à bien des égards à ces développements. Aux côtés des grands instruments, des instruments historiques et de plus petite taille continuent à être opérationnels pour des tâches spécifiques de surveillance, qu'il s'agisse des pulsars, des planètes ou du soleil, pour la recherche fondamentale et pour diverses applications. Ces instruments alimentent la recherche de la communauté scientifique internationale.

La condition de la poursuite de ces activités est la disponibilité de bandes de fréquences d'observation libres de perturbations préjudiciables au niveau des sites de radioastronomie. Dans un contexte de densification des usages et des quantités du spectre dédiées, cela passe par la mise à jour constante de la protection réglementaire internationale et européenne des bandes attribuées au service de radioastronomie. Mais cela doit aussi passer de plus en plus par des zones géographiques de plus forte protection autour des observatoires, notamment vis-à-vis des perturbations potentielles apportées par les émetteurs mobiles et « à faible portée ». Par exemple, en éteignant automatiquement ces émetteurs dans ces zones *via* des outils intégrés à la normalisation européenne et nationale et la géolocalisation. Enfin, ces zones contraintes pourraient permettre à la radioastronomie moderne d'observer dans des bandes attribuées à faible protection réglementaire et de répondre au besoin de bandes d'observation plus larges.