

DOSSIER

POUR LA
SCIENCE

Édition française de Scientific American

GALAXIES

Fenêtres sur l'Univers

LE CONTENU

LA STRUCTURE
DES BRAS SPIRAUX

LES TROUS NOIRS
DÉVOILÉS

LES FLAMBÉES
D'ÉTOILES

L'ÉVOLUTION

UN CANNIBALISME
SOUTENU

LA FORMATION
D'AMAS

UN VIDE
PLEIN DE NUAGES

LA NAISSANCE

LES LENTILLES
GRAVITATIONNELLES

L'ÉNERGIE SOMBRE

LES GRANDES
STRUCTURES



DOSSIER - JUILLET/SEPTEMBRE 2007

M 01930 - 56 - F: 6,90 € - RD



Révéler l'invisible

par les ondes radio

Le futur radiotélescope géant SKA, constitué d'une mosaïque d'antennes et de paraboles, pourra voir plus de matières plus loin que n'importe quel instrument actuel.

Steve TORCHINSKY et Wim van DRIEL

L' image populaire du cosmos est un grand vide avec des étoiles et des planètes éparpillées un peu partout, séparées par des distances énormes. Au sein d'une galaxie, elle est à peu près correcte. Mais à une échelle supérieure, on s'aperçoit que les distances entre les galaxies ne sont pas si énormes par rapport à leur taille. Loin d'être vide, l'Univers est au contraire rempli de galaxies ! Les plus grands sondages de l'Univers en ont catalogué plus d'un million, alors qu'ils ne portent que sur une petite partie du tout.

De surcroît, la lumière visible des galaxies ne dévoile qu'un aspect de la réalité, car la région du spectre électromagnétique que perçoit l'œil humain est très étroite : elle correspond à des longueurs d'onde comprises entre 0,38 (violet) à 0,7 (rouge) micromètre. Dans cette bande visible, on ne voit qu'une infime fraction de la matière qui rayonne dans l'Univers. En revanche, dans le domaine des ondes radio, au-delà d'un millimètre de longueur d'onde, apparaissent les vastes nuages d'hydrogène atomique, qui baignent les galaxies et constituent le matériau de construction des étoiles.

En outre, l'étude du rayonnement radio des galaxies nous donne accès aux deux mystères majeurs de la cosmologie et de la physique des particules : la matière noire et l'énergie sombre. La radioastronomie dévoile en effet la forme des galaxies lointaines, dont la lumière est très décalée vers les grandes longueurs d'onde. Or cette forme est parfois perturbée par la matière présente entre elles et l'observateur sur la ligne de visée (voir *La pesée des amas par la lumière*, par Y. Mellier, dans ce dossier). Elle nous informe donc sur le contenu, visible et invisible, de l'Univers.

On envisage, par ailleurs, d'effectuer un relevé dans le domaine radio de millions de galaxies de diverses époques afin d'étudier les fluctuations qui ont donné naissance aux grandes structures d'aujourd'hui. L'évolution de ces structures étant liée au contenu en matière et en énergie de l'Univers, un tel relevé nous aidera à comprendre l'énergie sombre, cause de l'actuelle accélération de l'expansion universelle. Ce relevé est l'objectif du futur radiotélescope géant SKA (voir la figure 1). Avant de présenter son fonctionnement, nous rappelons quelques faits d'armes de la radioastronomie.

L'atome d'hydrogène, le plus simple de la nature, est composé d'un proton et d'un électron, dont chacun possède

un spin (grossièrement une rotation sur lui-même). Quand les axes des deux spins sont alignés, l'atome est dans un état plus énergétique que lorsque les axes sont opposés. Bien que peu perturbés dans le milieu interstellaire, quelques atomes d'un nuage d'hydrogène neutre accèdent à l'état d'énergie supérieure, et se désexcitent en émettant un photon à la longueur d'onde de 21 centimètres. Cette transition se produit une fois tous les 100 ans par un atome.

L'âge d'or de la radioastronomie

En 1944, l'astronome néerlandais Hendrik Christoffel van de Hulst prédit que les nuages d'hydrogène neutre étaient assez abondants dans le milieu interstellaire pour que l'on puisse détecter la raie à 21 centimètres de longueur d'onde avec un radiotélescope terrestre. Elle le fut en effet moins de dix ans plus tard, en 1951, par les astronomes américains Harold Ewen et Edward Purcell, de l'Université d'Harvard à Cambridge. Cette découverte ouvrit une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

Très vite, on constata que les gros nuages d'hydrogène neutre étaient non seulement détectables, mais présents partout, dans notre Galaxie, comme dans d'autres. De plus, la taille des galaxies ne se limite pas à celle qu'elles ont sur les images prises dans le domaine visible. Par exemple, les bras spiraux de la galaxie Messier 83 observés dans l'émission de la raie à 21 centimètres sont cinq fois plus larges que ce qui est observé dans le visible (voir la figure 2). L'hydrogène est de loin la matière la plus répandue de l'Univers entier. À partir de cette époque, la radioastronomie entre dans un âge d'or. Simple curiosité jusqu'alors, elle devient essentielle à l'étude de la matière de l'Univers.

Plusieurs grands radiotélescopes ont été construits dans le monde dans les années 1950 et 1960. Quelques-uns l'ont été selon le principe d'une grande parabole orientable. Le plus grand fut pendant longtemps le 76 mètres de l'Observatoire Jodrell Bank, dans le Nord-Ouest de l'Angleterre. Encore opérationnel, il a été rebaptisé *Lovell* en l'honneur de son fondateur, l'astronome britannique sir Bernard Lovell. Une autre parabole orientable de renom est le 64 mètres de l'Observatoire Parkes, en Australie. La plus grande du monde est celle de Green Bank, aux États-Unis, qui mesure 100 mètres de diamètre.



1. LE PROJET DE RADIOTÉLESCOPE géant dénommé *Square kilometre Array* (SKA) se composera de milliers d'antennes radio (au premier plan), d'une centaine de télescopes paraboliques de taille modeste (arrière-

plan) et de quelques stations de diamètre équivalent à 200 mètres, le tout disposé sur des milliers de kilomètres carrés. L'instrument SKA sera construit en 2015, en Australie ou en Afrique du Sud.

Au-delà de 100 mètres, la parabole orientable devient coûteuse à construire et à entretenir. C'est pourquoi on a conçu des télescopes immobiles qui profitent de la rotation de la Terre pour sonder différentes directions dans le ciel. L'un des premiers grands radiotélescopes de ce genre se trouve en France, à la Station de radioastronomie de Nançay. Situé dans la forêt de Sologne, il équivaut à un télescope de 94 mètres de diamètre et fonctionne depuis 1965. Le record du monde est détenu par le radiotélescope d'Arecibo, mesurant 305 mètres de diamètre, construit dans une vallée de l'île de Porto Rico. Il a fait ses premières observations en 1963, et reste la plus grande surface collectrice du monde.

Le principe n'a pas évolué, mais le système lui-même a été perfectionné. En particulier, les récepteurs sont bien plus sensibles qu'auparavant, et les spectromètres sont devenus très performants. La résolution spectrale, autrement dit le nombre de « couleurs » observées, et la largeur de bande traitée en radioastronomie sont inégalées en astronomie optique ou infrarouge.

La course aux instruments

Cependant, la résolution angulaire d'un télescope, qui est proportionnelle au rapport de la longueur d'onde à son diamètre, reste médiocre en radioastronomie du fait des grandes longueurs d'onde captées. Ainsi, le radiotélescope d'Arecibo ne mesure que 1 452 fois les 21 centimètres de longueur d'onde de la raie d'hydrogène neutre, tandis que le diamètre du télescope optique *Keck* (dix mètres), à Hawaii, comporte deux millions de longueurs d'onde.

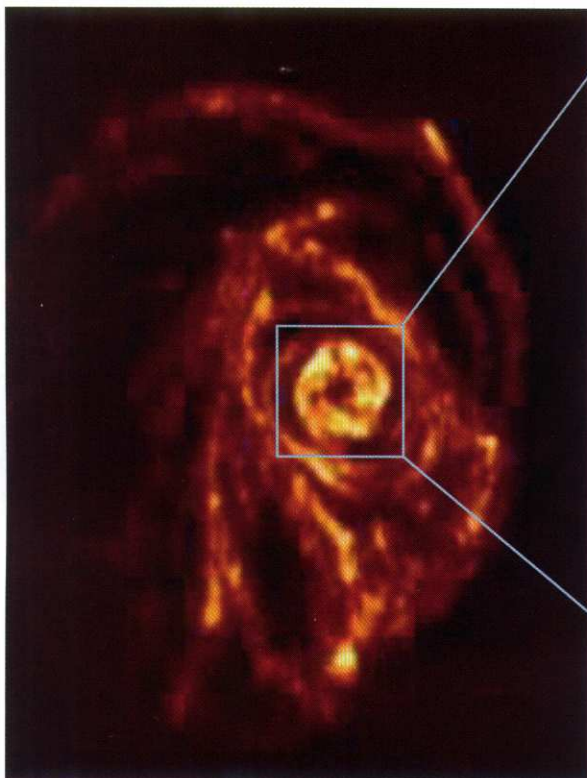
Pour surmonter ce handicap, les radioastronomes ont développé des méthodes d'interférométrie : en combinant

les creux et les bosses des ondes lumineuses, ils synchronisent plusieurs télescopes (dits « phasés ») en un seul grand télescope de synthèse, dont le diamètre équivaut à l'écartement entre les composants. Un télescope de ce type a été construit à Westerbork, au Pays-Bas : il comprend 14 paraboles de 25 mètres de diamètre chacune.

Grâce à des coopérations internationales, il suffit de combiner les signaux venant des plus grands radiotélescopes, dont *Lovell*, *Arecibo*, *Effelsberg*, ainsi que le réseau phasé de Westerbork, pour obtenir l'équivalent d'un télescope de la taille de la Terre. On arrive ainsi à des résolutions angulaires d'une milliseconde d'arc. Quand on a ajouté les données du radiotélescope spatial japonais HALCA, qui opérait entre 1997 et 2005, la résolution angulaire était mesurée en microsecondes d'arc. Cela équivaut à discerner depuis la Terre une pièce d'un centime posée sur la Lune.

Toutefois, malgré une meilleure performance des récepteurs et l'astuce des réseaux phasés, la sensibilité des radiotélescopes actuels n'est pas suffisante pour sonder les galaxies de l'Univers lointain. Le sondage de galaxies mesurées par leur rayonnement d'hydrogène neutre n'est que de 20 000, et ne concerne que des galaxies relativement proches de la nôtre. C'est médiocre par rapport au sondage d'un million de galaxies accompli en optique par le *Sloan Digital Sky Survey*, un réseau d'observations regroupant 25 pays dans le monde.

Pour faire une véritable percée en radioastronomie, un grand consortium international a entrepris la construction d'un nouveau système, qui dépassera la puissance des instruments actuels de deux ordres de grandeur. Des milliers d'antennes et paraboles auront la capacité d'une parabole d'une surface d'un million de mètres carrés, soit



Anglo-Australian Observatory/Photo par David Malin

2. LA GALAXIE SPIRALE MESSIER 83, éloignée de plusieurs millions d'années-lumière, s'étend sur des dizaines de milliers d'années-lumière. Elle apparaît cinq fois plus grande quand elle est observée dans le domaine des ondes radio (*fausses couleurs rouges, à gauche*) que dans le domaine visible (*à droite*).

un télescope de 1 100 mètres de diamètre. Nommé *Square Kilometre Array* (SKA), cet instrument verra le jour en 2015 et sera opérationnel en 2020.

Un réseau d'un kilomètre carré

Le SKA combinera plusieurs technologies afin de bénéficier des avantages à la fois des petits et des très grands télescopes. Une parabole de diamètre modeste possède un grand champ de vue, aux dépens de sa résolution angulaire. Au contraire, une très grande parabole a une meilleure résolution angulaire, mais un champ de vue restreint. Au centre de l'instrument SKA, un territoire d'un kilomètre carré sera parsemé de plusieurs milliers de petites antennes, lesquelles viseront directement le ciel entier, sans qu'aucun miroir parabolique ne concentre le rayonnement céleste. Reliées en réseau, ces petites antennes, à très large champ de vue, composeront l'équivalent d'une grande surface collectrice, visualisant tout le ciel instantanément.

Autour de ces antennes se trouveront des paraboles de taille modeste, et plus loin encore, une centaine de stations composées de quelques dizaines de paraboles chacune, et des stations distantes de 3 000 kilomètres du centre. L'écartement des stations procurera une fine résolution angulaire, jusqu'au centième de seconde d'arc à une longueur d'onde de 21 centimètres. La conjugaison de l'ensemble confèrera à l'instrument une remarquable sensibilité.

Constitué d'antennes et de paraboles simples, mais en grand nombre, cet instrument représente une manière originale de faire des observations astronomiques. Par ailleurs, le traitement informatique ouvre de nouvelles possibilités. Convertis en données numériques, puis convenablement multipliés et additionnés, les signaux des antennes et

paraboles donneront accès à diverses directions dans le ciel, tout à la fois. Le SKA sera un télescope multitâche.

Pour fabriquer une image, le calculateur du SKA prendra en compte 32 000 lignes de base. Un centre de calcul échantillonnera instantanément 250 degrés carrés, soit de manière contiguë, pour produire une image classique, soit dans huit directions indépendantes. Pour ce faire, le calculateur devra être capable d'effectuer environ 10^{16} opérations par seconde.

En moins d'une année de temps de télescope, on aura sondé un milliard de galaxies. Ce sondage, d'une taille exceptionnelle par rapport à celles des autres grands relevés de galaxies envisagés, révélera la distribution et la forme des galaxies dans le ciel, tandis que la spectroscopie donnera leurs décalages vers le rouge (le *redshift z*), jusqu'à $z = 2$, soit jusqu'à environ huit milliards d'années-lumière de nous.

Cette base de données nous aidera, plus que tout autre, à étudier les divers processus qui président à l'évolution des galaxies et des grandes structures de l'Univers, car un gaz interstellaire rare, comme l'hydrogène neutre, y est bien plus sensible que les étoiles. La précision angulaire et la sensibilité profonde du SKA dévoileront la morphologie de dix milliards de galaxies lointaines. Ainsi la matière noire et l'énergie sombre, les deux mystères les plus lancinants de l'astrophysique actuelle, ne résisteront pas à l'acuité du SKA.

Steve TORCHINSKY, chercheur invité à l'Observatoire de Paris, est responsable scientifique du projet européen Square Kilometre Array Design Studies.

Wim van DRIEL, astronome à l'Observatoire de Paris, représente la France au Comité de pilotage du projet SKA international.
<http://www.skatelescope.org/>