



## The next generation radiotelescopes / Les radiotélescopes du futur

## Foreword

The URSI-France 2011 Scientific Workshop “The Next Generation Radiotelescopes”, organized under the auspices of the French Academy of Science, took place at the Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) in Paris on March 29–30, 2011.

Radioastronomy is entering a new and promising era with exceptional discoveries. They benefit from the worldwide development of projects and from the application of the most advanced technologies that are shared with all radiosciences. Noteworthy, the recent missions of the European Space Agency (Rosetta, Herschel, and Planck) constitute remarkable successes, which illustrate the importance of the radio domain. They bring a wealth of new results in all fields of astrophysics, from planetary sciences to cosmology. The next generation radiotelescopes will need high sensitivity receivers, phased arrays, high capacity data links, unprecedented computing capacities, etc., that are presently under development. Ground-based facilities in advanced stages of construction, such as LOFAR, ASKAP, MeerKAT, ALMA, etc., will allow us to demonstrate their feasibility. These developments, also of importance to geosciences, have thus been discussed in their international context. The workshop offered a timely opportunity to approach these matters in the pluridisciplinary environment of URSI-France.

The Scientific Organizing Committee selected a few emblematic contributions that are collected in this special issue of the *Comptes Rendus Physique* of the French Academy of Science. Unfortunately, for lack of space, it was not possible to publish here all the contributions which were deserving it.<sup>1</sup> The organizing committee has thus tried to make a selection that gives a glimpse on the vividness of this field of science in France.

The first contribution, by **Pagani et al.**, provides us with a status on the far infrared and sub-millimeter telescope launched by ESA in May 2009. The satellite, named after the discoverer of infrared radiation (W. Herschel), is operating successfully at  $1.5 \times 10^6$  km from Earth, around the second Lagrangian point of the Earth–Sun system (a position that permits an efficient protection against heating by the Sun, as well as by Earth). It allows us to perform observations in a part of the spectrum which is opaque to ground-based observatories, and, noteworthy, to observe the important radio lines of H<sub>2</sub>O and of its isotopologues. A heterodyne instrument (HIFI) has been developed to operate in the THz spectrum and provides exquisite results on water, and on other species of astrophysical interest.

In the second paper, by **Uson and Cotton**, we get an overview of the difficulties of observing in the 327 MHz band (where lies an important deuterium line) and of the procedure that have been developed by these authors to overcome the effects of the time-varying propagation through the ionosphere, as well as of the variations of the synthesized beam-profile of an interferometer with the direction of observation. The example which is treated is taken from a VLA observation at 327 MHz, but the method can be generalized to other interferometers and other frequencies.

The French laboratories are contributing to the international developments of three major interferometers, ALMA (80–950 GHz), SKA (70 MHz–10 GHz) and LOFAR (10–250 MHz). The latter is developed in Europe under the leadership of ASTRON in the Netherlands. It consists of a hierarchy of antennas, sub-stations and stations, one of which is located in Nançay (Région Centre), within a sparsely populated area. **Griessmeier et al.** give a review of the key science programmes that will be explored with LOFAR, and present very recent results obtained with the French station. **Tasse et al.** report on the challenge of calibrating LOFAR data which, similarly to the VLA, are affected by direction-dependent effects. Finally **Girard et al.** discuss the possibility of expanding the LOFAR station in Nançay in order to get a powerful instrument that could be used in a stand-alone mode when the station is not needed by the International LOFAR Telescope (ILT).

**Letrou et al.** discuss the use of the RATAN-600 radiotelescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Science at millimeter wavelengths. This radiotelescope has a unique design which consists of 895 rectangular reflectors arranged in a circle of  $\sim 600$  m diameter. It has been mainly used in the frequency bands from 600 MHz to 30 GHz. The authors analyze its performances at higher frequencies with a new physical optics algorithm adapted to the complex RATAN-600 antenna system.

<sup>1</sup> All electronic contributions can be accessed on the URSI-France web-site: [http://ursi-france.institut-telecom.fr/pages/pages\\_evenements/journees\\_scient/docs\\_journees\\_2011/data/index.html](http://ursi-france.institut-telecom.fr/pages/pages_evenements/journees_scient/docs_journees_2011/data/index.html).

Evidence has recently been brought in 1998 that the Universe is in a phase of accelerating expansion. The 2011 Nobel prize of Physics was awarded for this discovery. Dark Energy has been hypothesized to be responsible for this accelerated expansion. The distribution of matter in the early Universe can be used as a probe constraining the nature of Dark Energy. **Ansari et al.** propose to measure the spatial power spectrum of matter at redshift above  $z \sim 0.3$  by observing the statistical properties of the redshifted atomic hydrogen emission at 21 cm ( $\equiv 1420$  MHz). The treatment of the foreground emission and the calibration of instrumental noise are serious challenges, that require a special electronic pipeline described in this paper.

Remote sensing techniques have evolved considerably since the beginning of the Space era. In astronomy, they are used to investigate the properties of Solar System objects, such as planets, satellites, asteroids, and comets. They are also used to characterize the (planet!) Earth, its atmosphere, surfaces, etc. **Defer et al.** discuss passive remote sensing techniques using sub-millimeter/millimeter waves (SMMW) in order to probe the cycle of water in the Earth atmosphere. In this contribution, they also describe the instrumentation programme of their group at the Observatory of Paris.

**Monfardini et al.** give an impressive overview of the design and development of a novel imaging camera for millimeter and sub-millimeter telescopes. It is based on Kinetic Inductance Detector (KID) arrays developed at the Néel Institute in Grenoble. The authors have constructed a camera (NIKA) with 144 pixels that has been tested on the 30-m IRAM radiotelescope in Pico Veleta (Spain). The results are promising and confirm that KID-arrays may offer an interesting alternative to bolometer arrays.

Radioastronomical observations require a high sensitivity. However, even in remote locations, ground-based observatories are affected by radio frequency interferences (RFIs). An important effort is made world-wide in order to mitigate the deleterious effects of RFIs, and **Hellbourg et al.** report on an original approach that makes use of the cyclo-stationary property of many man-made RFIs.

Pulsars are remnants of massive stars whose interiors have collapsed during a supernova explosion. The neutron stars which are left over are rapidly rotating and emit a beam of electromagnetic radiation, detected in the radio range as short pulses when the beam sweeps past the observer. Pulsars are important for their properties that allow us to test the laws of Physics in extreme conditions, and also as probes of the interstellar medium. **Ait-Allal et al.** have developed a new method to efficiently extract the short, and sometimes intermittent, pulses out of RFI-poised data without a priori knowledge on the pulsar rotation period.

The editors warmly thank the authors for their contributions to this special issue of the Comptes Rendus Physique de l'Académie des Sciences, the Editorial Board, and the referees for their expert assistance.

For the definition of many astronomical terms, one may refer to the on-line dictionary:

<http://www.obspm.fr/dico>

Hereafter a few useful acronyms employed in this special issue are given.

ALMA: Atacama Large Millimeter (and sub-millimeter) Array  
 APEX: Atacama Pathfinder EXperiment  
 ASKAP: Australian Square Kilometre Array (SKA) Pathfinder  
 ASTRON: "Netherlands Institute for Radio Astronomy"  
 BAO: Baryon Acoustic Oscillation  
 CASPER: Center for Astronomy Signal Processing and Electronics Research  
 CMB: Cosmic Microwave Background  
 DAC: Digital to Analog Converter  
 ESA: European Space Agency  
 FFT: Fast Fourier Transform  
 FOV: Field of view  
 FPGA: Field-Programmable Gate Array  
 GEO: Geostationary Earth Orbit (36 000 km above sea level)  
 GPU: Graphical Processing Unit  
 HEB: Hot Electron Bolometer  
 HIFI: Heterodyne Instrument for the Far Infrared (Herschel Space Observatory)  
 ILT: International LOFAR Telescope  
 IRAM: Institut de Radioastronomie Millimétrique  
 ISO: Infrared Space Observatory  
 ISM: Interstellar medium  
 KID: Kinetic Inductance Detector  
 LEO: Low Earth Orbit (typically 1000 km above sea level)  
 LOFAR: LOw Frequency ARray  
 MeerKAT: "South-African Square Kilometre Array (SKA) Pathfinder"  
 NIKA: Néel IRAM KID Arrays  
 NRT: Nançay Radio Telescope  
 NVSS: NRAO VLA Sky Survey

PACS: Photodetector Array Camera and Spectrometer (Herschel Space Observatory)  
 RATAN-600: “Academy of Science Radio Telescope” (Russian Federation)  
 RFI: Radio frequency interference  
 SIS: Superconductor–Insulator–Superconductor  
 SKA: Square Kilometre Array  
 SMMW: Sub-Millimetre/Millimetre Wave  
 SPIRE: Spectral and Photometric Imaging REceiver (Herschel Space Observatory)  
 UHF: Ultra High Frequency (300 MHz to 3 GHz)  
 URSI: Union Radio Scientifique Internationale  
 VLA: Very Large Array

## Avant-propos

Les Journées Scientifiques «Les radiotélescopes du futur» se sont tenues au Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) à Paris les 29 et 30 mars 2011, sous les auspices de l'Académie des Sciences.

La Radioastronomie vit actuellement une période exceptionnelle avec des découvertes récentes fondamentales. Elles reposent sur un développement de projets à l'échelle planétaire avec la mise en application des technologies les plus innovantes, partagées avec l'ensemble de la communauté radioélectrique. En particulier, les missions récentes de l'Agence spatiale européenne (Rosetta, Herschel, Planck) constituent des réussites technologiques remarquables qui illustrent l'importance du domaine radio. Elles apportent une moisson de résultats dans tous les domaines de l'astrophysique depuis la planétologie jusqu'à la cosmologie. Les radiotélescopes de nouvelle génération requièrent des récepteurs à très haute sensibilité, des antennes phasées, des transports de données à très haute capacité, des moyens de calcul sans précédent, qui sont actuellement en développement. Les instruments terrestres récemment construits ou en cours de construction (LOFAR, MeerKAT, ASKAP, ALMA) vont permettre la mise au point des technologies indispensables à ces réalisations. Les développements, également appliqués à l'observation de la Terre, furent replacés dans le contexte international. Les Journées Scientifiques 2011 ont été l'occasion d'évoquer ces questions dans le cadre interdisciplinaire d'Ursi-France.

Le Comité Scientifique d'Organisation a sélectionné quelques contributions emblématiques qui sont regroupées dans ce numéro spécial des Comptes Rendus Physique de l'Académie des Sciences. Malheureusement, par manque de place il n'était pas possible de publier ici toutes les contributions qui l'auraient mérité.<sup>2</sup> Le Comité Scientifique d'Organisation a donc essayé d'effectuer une sélection qui fournisse un aperçu de la richesse de ce domaine scientifique en France.

La première contribution, par **Pagani et al.**, présente le télescope infrarouge-lointain et sub-millimétrique récemment lancé par l'Agence Spatiale Européenne (Herschel). Le satellite, nommé du nom de celui qui a découvert le rayonnement infrarouge, fonctionne à une distance de  $1,5 \times 10^6$  km de la Terre, en orbite autour du point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil. Il nous permet ainsi d'observer dans un domaine spectral inaccessible depuis le sol, et donc, en particulier, d'observer les raies de l'eau et de ses isotopologues. Un instrument hétérodyne fonctionnant dans le domaine TéraHertz fournit des résultats exceptionnels sur ces espèces moléculaires, et bien d'autres.

**Uson et Cotton** présentent une revue sur les difficultés à observer dans la bande à 327 MHz (où se trouve une raie importante du deutérium) et sur les procédures qu'ils ont développées pour corriger les effets de la transmission à travers l'ionosphère, ainsi que de la dépendance du lobe d'un interféromètre radio en fonction de la direction d'observation. Ils illustrent leur contribution par un exemple obtenu à 327 MHz au VLA, mais leur méthode peut être généralisée à d'autres interféromètres et à d'autres fréquences.

Les laboratoires français participent activement au développement international de trois interféromètres géants, ALMA (80–950 GHz), SKA (70 MHz–10 GHz), et LOFAR (10–250 MHz). Ce dernier est construit en Europe sous l'égide de l'institut néerlandais de radioastronomie, ASTRON. Il est constitué d'antennes élémentaires, regroupées en sous-stations, elles-mêmes regroupées en stations réparties à travers l'Europe. Une de ces stations est située à Nançay, en Région Centre, dans une zone faiblement peuplée. **Griessmeier et al.** exposent les principaux programmes scientifiques qui motivent le projet LOFAR, et présentent les premiers résultats obtenus avec la station française. **Tasse et al.** discutent des difficultés de la calibration des données LOFAR, en particulier dues aux effets de la dépendance directionnelle de la réponse instrumentale. Enfin, **Girard et al.** examinent la possibilité de transformer la station française en un puissant instrument capable de fonctionner en mode autonome lorsque le projet LOFAR international n'utilisera pas cette station.

**Letrou et al.** examinent la réponse, aux longueurs d'onde millimétriques, du radiotélescope RATAN-600 de l'Académie des Sciences Russe. Ce radiotélescope d'une conception unique, avec 895 miroirs rectangulaires disposés en un anneau de 600 m de diamètre, a essentiellement été utilisé dans les bandes centimétriques, de 600 MHz à 30 GHz. Les auteurs ont développé une méthode originale de Physique Optique pour modéliser la réponse de ce système complexe dans le domaine radio-millimétrique.

Il est apparu récemment (depuis 1998) que l'Univers est dans une phase d'expansion accélérée. Le prix Nobel de Physique 2011 a été attribué pour cette découverte majeure de la cosmologie moderne. Pour expliquer cette accélération on invoque

<sup>2</sup> Toutes les contributions sont accessibles sous forme électronique sur le site internet d'Ursi-France : [http://ursi-france.institut-telecom.fr/pages/pages\\_evenements/journees\\_scient/docs\\_journees\\_2011/data/index.html](http://ursi-france.institut-telecom.fr/pages/pages_evenements/journees_scient/docs_journees_2011/data/index.html).

une énergie « sombre », de nature actuellement inconnue. La distribution de matière dans l'Univers jeune pourrait servir à contraindre la nature de cette énergie sombre. **Ansari et al.** proposent de cartographier l'émission de l'hydrogène atomique à 21 cm (i.e. 1400 MHz) sans passer par l'identification des sources individuelles. La difficulté de cette méthode se trouve dans le traitement des sources d'avant-plan, et dans la calibration instrumentale.

Les techniques de télédétection ont fait des progrès considérables depuis le début de l'ère spatiale. En astronomie, on les utilise pour explorer les propriétés des objets du Système Solaire, planètes, satellites, astéroïdes, comètes. On les utilise aussi pour étudier la (planète) Terre, son atmosphère, ses surfaces, etc. **Defer et al.** présentent une revue des techniques de télédétection utilisant les ondes millimétriques et sub-millimétriques afin d'étudier le cycle atmosphérique de l'eau. Dans leur contribution, ils présentent aussi le programme instrumental de leur groupe à l'Observatoire de Paris.

**Monfardini et al.** présentent une description de la conception et du développement d'une caméra pour l'imagerie millimétrique et sub-millimétrique. Celle-ci est basée sur des matrices de détecteurs à inductance cinétique développées à l'Institut Néel à Grenoble. Une caméra de 144 pixels a été testée avec succès sur le télescope de 30 m de l'IRAM au Pico Veleta (Espagne). Les résultats prometteurs montrent que de telles matrices pourraient offrir une alternative intéressante aux matrices de bolomètres actuellement utilisées.

Les observations radioastronomiques requièrent une très grande sensibilité. Malheureusement, même dans les endroits les plus reculés, les radiotélescopes modernes sont affectés par des interférences. Un important effort se développe au niveau mondial pour mettre au point des méthodes permettant de réduire la nocivité de ces interférences. **Hellbourg et al.** présentent une méthode originale basée sur le caractère cyclo-stationnaire de nombreuses interférences d'origine humaine.

Les pulsars sont des restes d'étoiles massives dont les cœurs se sont effondrés lors d'une explosion de type supernova. Ces étoiles à neutrons sont en rotation rapide et émettent un rayonnement électromagnétique dans des faisceaux qui balayent l'espace, et qui est détecté en radio sous la forme d'impulsions étroites (pulses). Les pulsars sont importants, car ils nous permettent de tester les lois de la Physique dans des conditions extrêmes, et car ils permettent aussi de sonder le milieu interstellaire sur leurs lignes de visée. **Ait-Allal et al.** ont développé une nouvelle méthode pour extraire efficacement les pulses brefs, et parfois intermittents, des données contaminées par les interférences radio, sans a priori sur la période de rotation du pulsar.

Les éditeurs remercient chaleureusement les auteurs pour leurs contributions à ce numéro spécial des Comptes Rendus Physique de l'Académie des Sciences, le Bureau éditorial, et les rapporteurs pour leur assistance.

On trouvera les définitions des nombreux termes astronomiques utilisés dans ce numéro thématique sur le site :

<http://www.obspm.fr/dico>

Thibaut Le Bertre, André Deschamps  
*LERMA, Observatoire de Paris,*  
*61, avenue de l'Observatoire,*  
*Paris, France*

*E-mail addresses:* [Thibaut.LeBertre@obspm.fr](mailto:Thibaut.LeBertre@obspm.fr) (T. Le Bertre), [andre.deschamps@obspm.fr](mailto:andre.deschamps@obspm.fr) (A. Deschamps)

Available online 11 December 2011