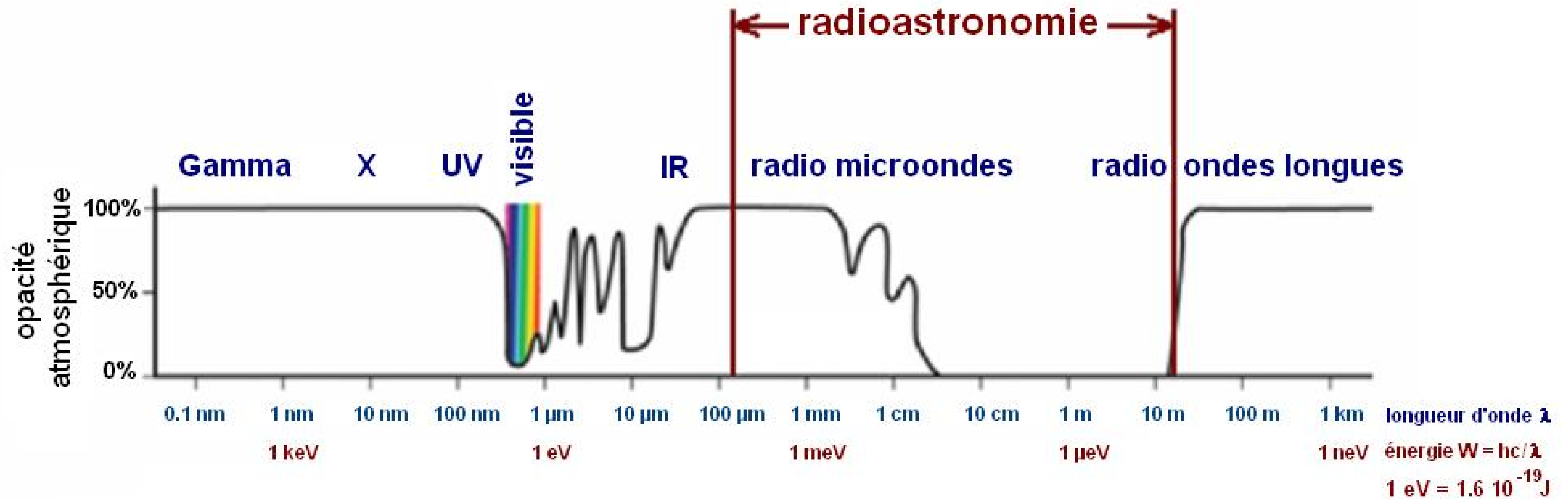


La radioastronomie :

tous à l'écoute du ciel

Les ondes électromagnétiques messagères de l'Univers



le spectre électromagnétique vu au travers de l'atmosphère terrestre

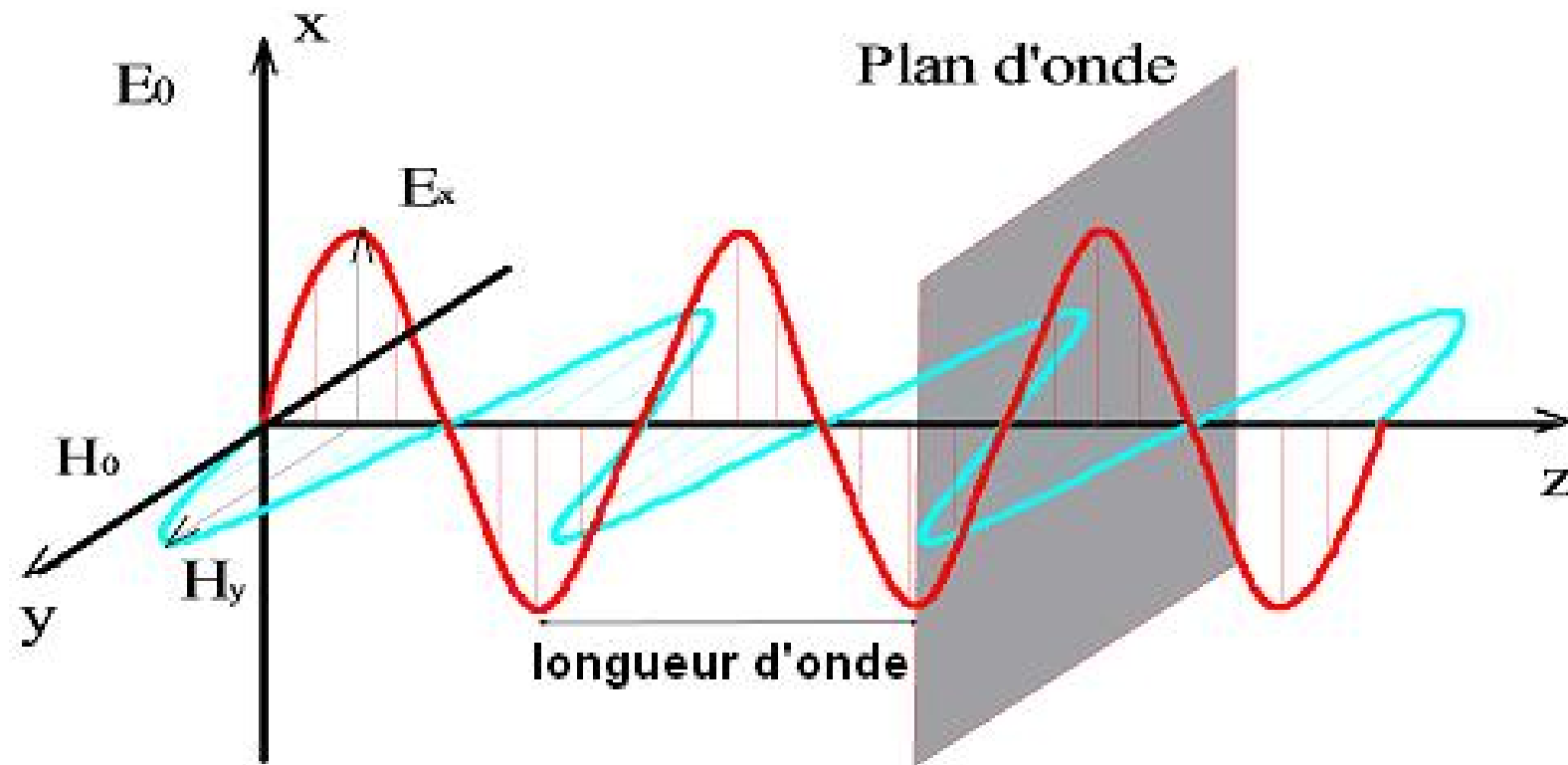
Le **spectre** est l'ensemble des constituants élémentaires d'un signal complexe : par exemple, la lumière du Soleil, blanche en plein jour, est décomposée en multiples couleurs lorsqu'elle traverse un prisme.



Spectre du Soleil dans le visible. On observe les raies d'absorption dues à l'atmosphère solaire.

Chaque couleur possède une **fréquence** f ou encore une **longueur d'onde** $\lambda = c/f$; c est la **célérité** de l'onde (pour la lumière : 300000 km/s dans le vide).

Le **rayonnement électromagnétique** est matérialisé par une **onde** qui transporte de l'**énergie** sous forme quantifiée : les **photons**.



Dans une onde électromagnétique, le **champ électrique** E et le **champ magnétique** H se propagent à la vitesse c en oscillant à la fréquence f (onde monochromatique)

Les **ondes radioélectriques** ou **ondes herziennes** correspondent aux fréquences les plus basses du spectre électromagnétique. Les **photons radioélectriques** ont une **faible énergie**.

Exemple : un photon porté par une onde de longueur $\lambda = 10 \text{ cm}$ a une énergie de 10 micro-électron-volt, soit $1.6 \cdot 10^{-24} \text{ Joule}$.

En **radioastronomie**, on mesure la **densité de flux de photons reçus** en **Jansky** :

$$1 \text{ Jansky} = 10^{-26} \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{Hz}$$

$$(1 \text{ watt} = 1 \text{ Joule/seconde})$$

L'origine des ondes électromagnétiques dans l'Univers

Les **objets chauds** produisent un **rayonnement thermique** à spectre continu :
par exemple les nuages de gaz chauds où se forment les étoiles

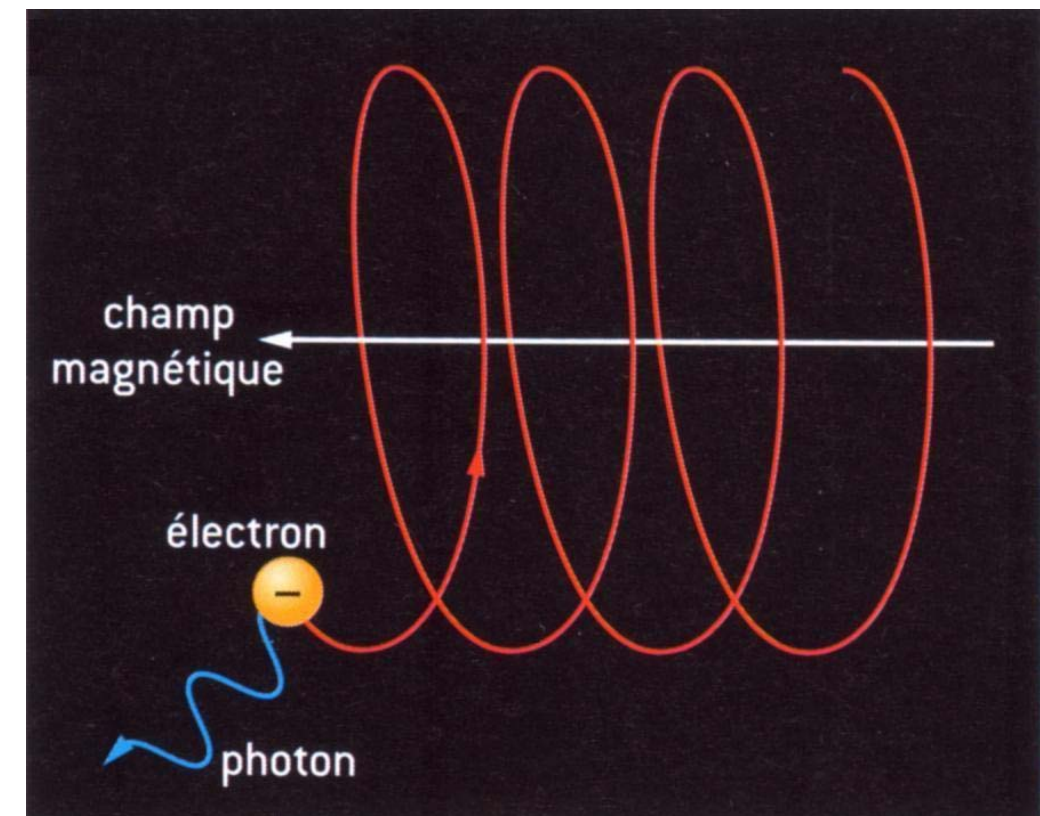
Nuage de gaz dans l'amas de Coma - Palomar Digital Sky Survey



Les **électrons** accélérés par des **champs magnétiques** produisent du **rayonnement synchrotron** à large bande

Les interactions entre **électrons** et **noyaux atomiques** et **électrons** et **photons** produisent d'autres rayonnements à spectre continu

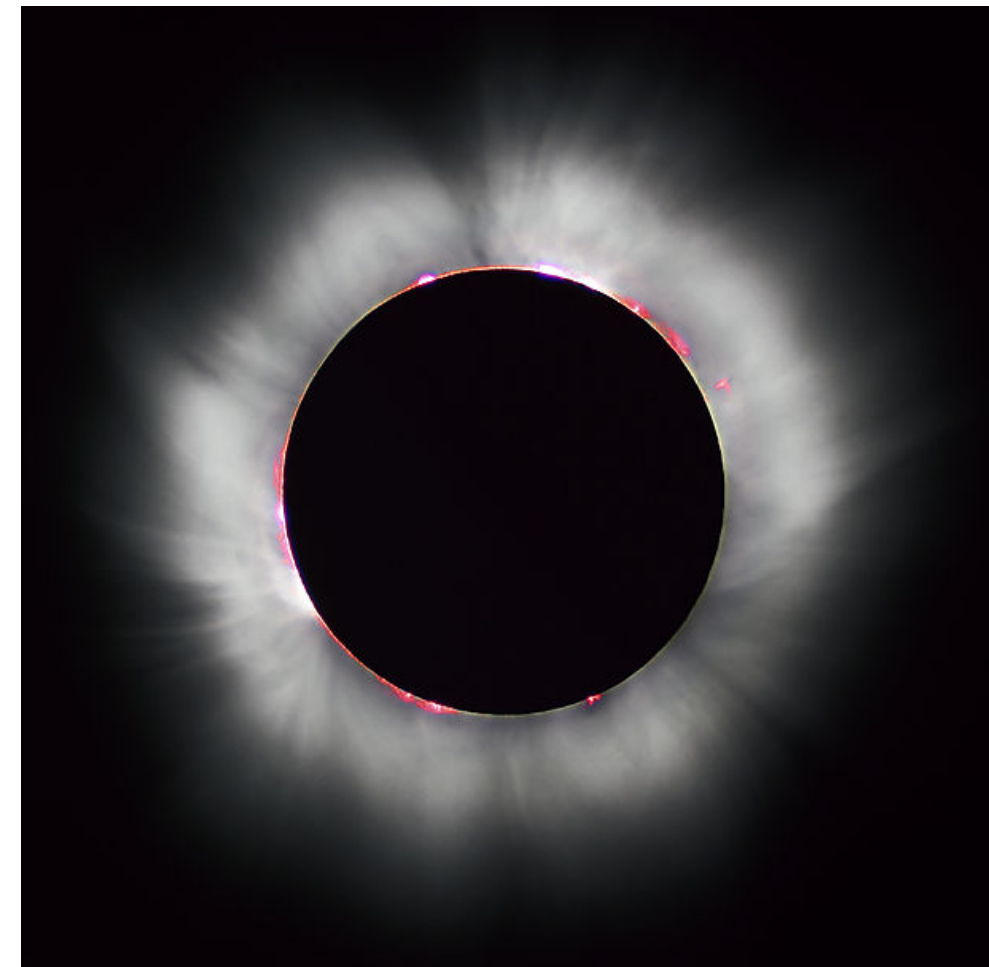
Source du rayonnement synchrotron - d'après Y. Nazé, Les Couleurs de l'Univers



Les nuages interstellaires, les atmosphères d'étoiles, etc sont formés de **gaz ionisés** qui constituent des **plasmas**

Les interactions entre **plasmas**, **ondes électromagnétiques** et **électrons** produisent des **oscillations**, sources de rayonnement électromagnétique à large bande

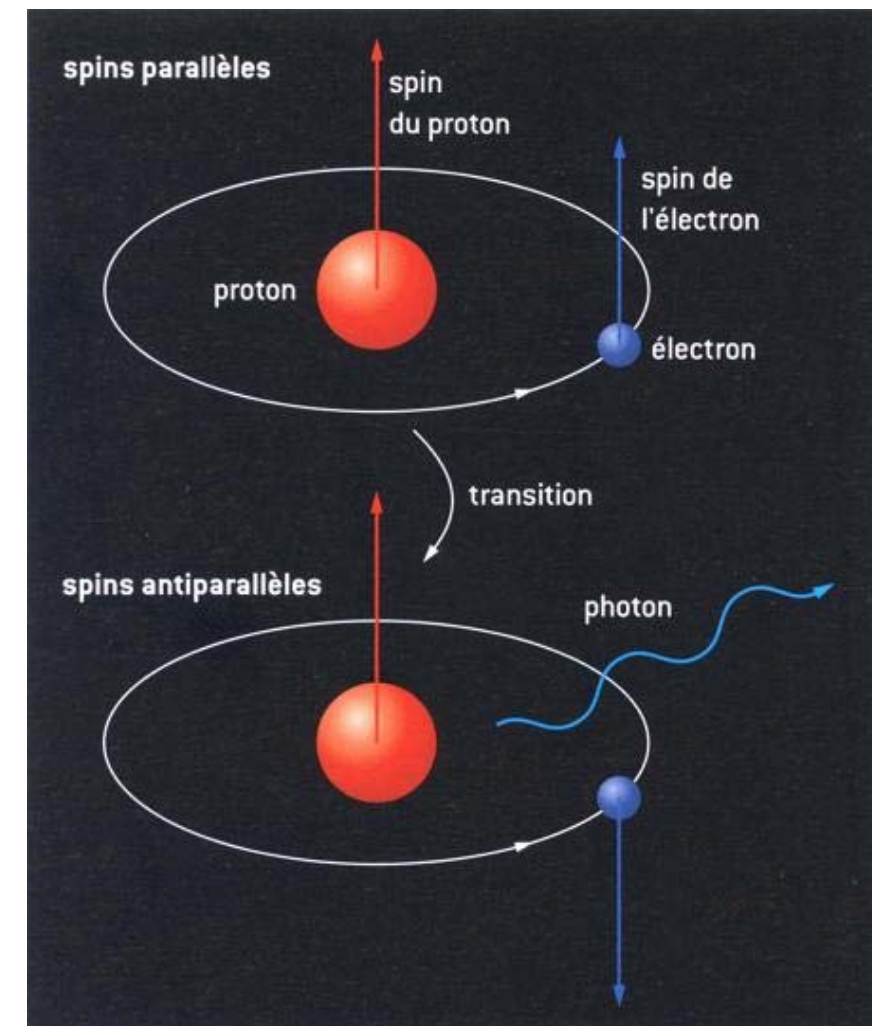
La couronne solaire visible en France lors de l'éclipse totale de 1999 - photo : Luc Viatour



Les **atomes et molécules** subissent des **transitions entre états** d'énergies différentes, ce qui se traduit par **l'émission ou l'absorption de photons** à des fréquences particulières : on parle de **spectre de raies**

Les spectres de raies sont une véritable **signature** des espèces chimiques présentes

Transition hyperfine de spin de l'atome d'hydrogène à 1420 MHz



La radioastronomie

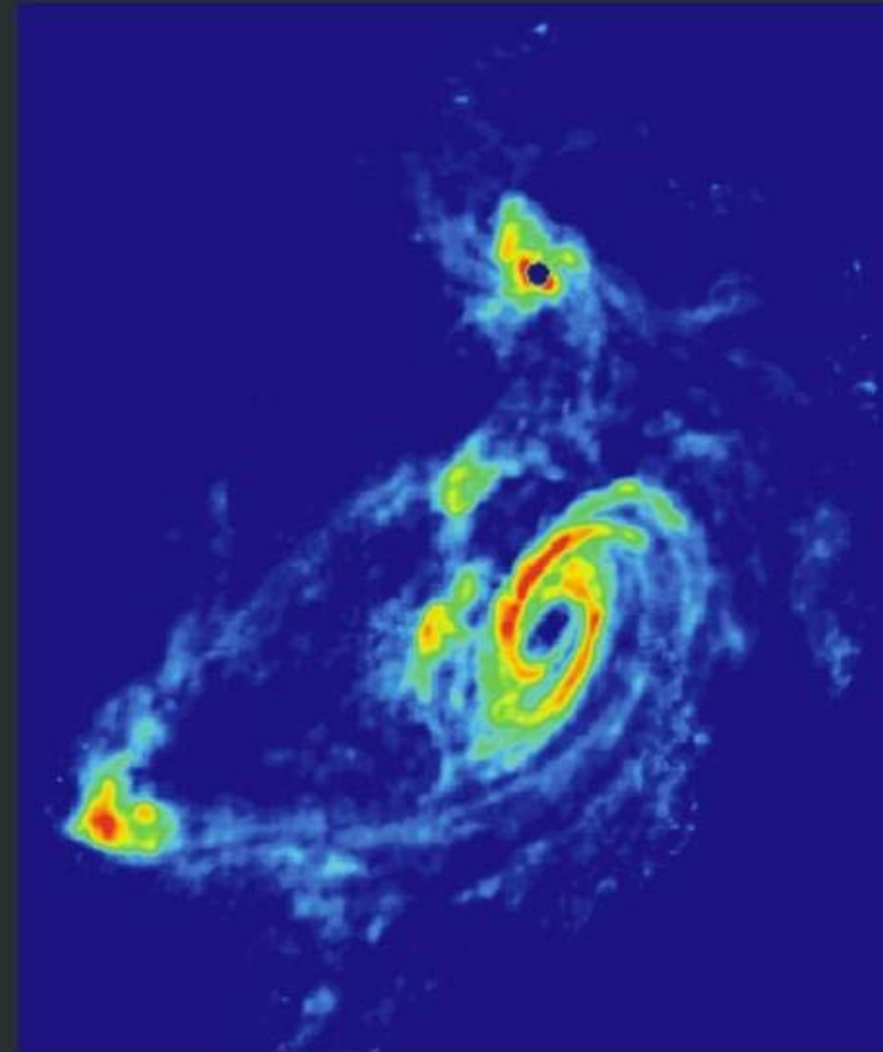
La radioastronomie observe l'Univers dans le domaine des ondes radioélectriques. C'est une « astronomie de l'invisible » qui apporte des informations très riches, complémentaires de celles obtenues dans le visible.

Interactions de marée dans le groupe de galaxies M81

Observation dans le visible

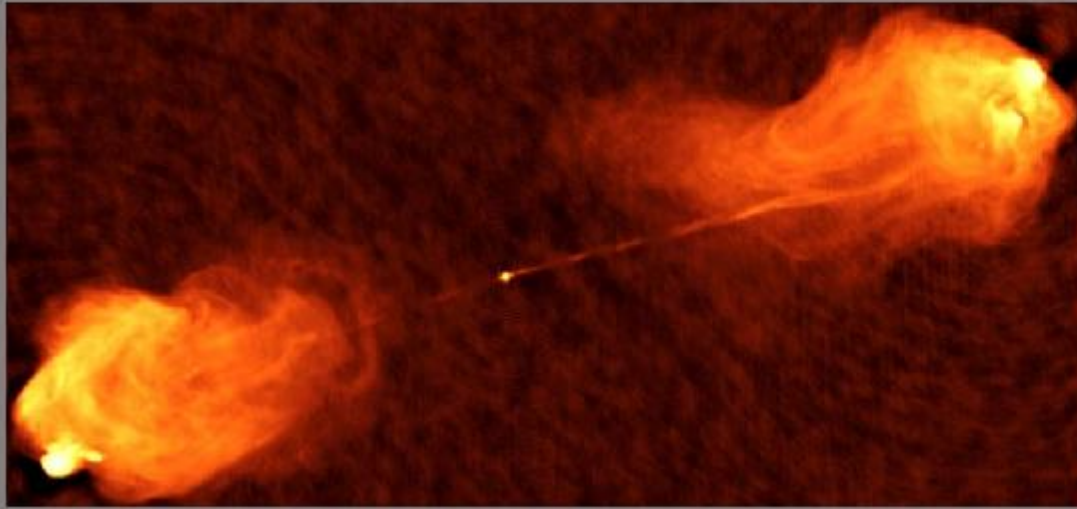


Observation raie radio H1 21cm

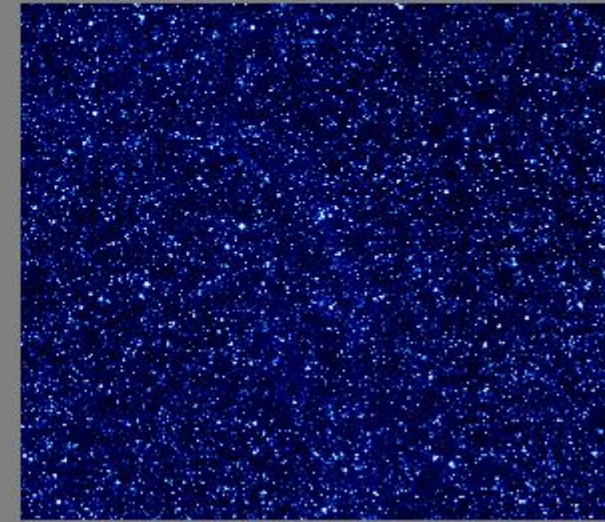


Radiosource Cygnus A

Observation radio 5 GHz

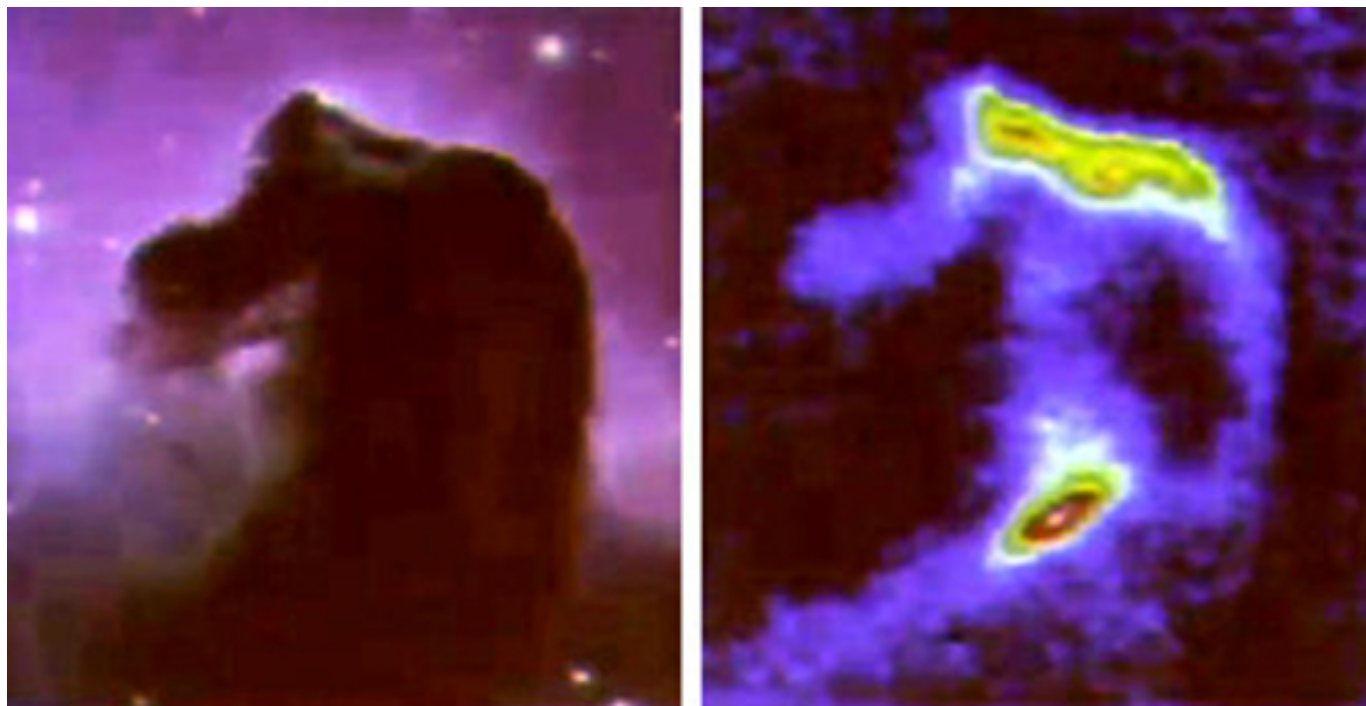


Observation dans le visible



Crédit: NRAO/AUI - VLA & Palomar Sky Survey

La **radiosource Cygnus A** se situe à 600 millions d'années-lumière*. Les ondes radio proviennent d'électrons rapides éjectés depuis le point central - probablement un trou noir - qui rayonnent par effet synchrotron dans les deux lobes.

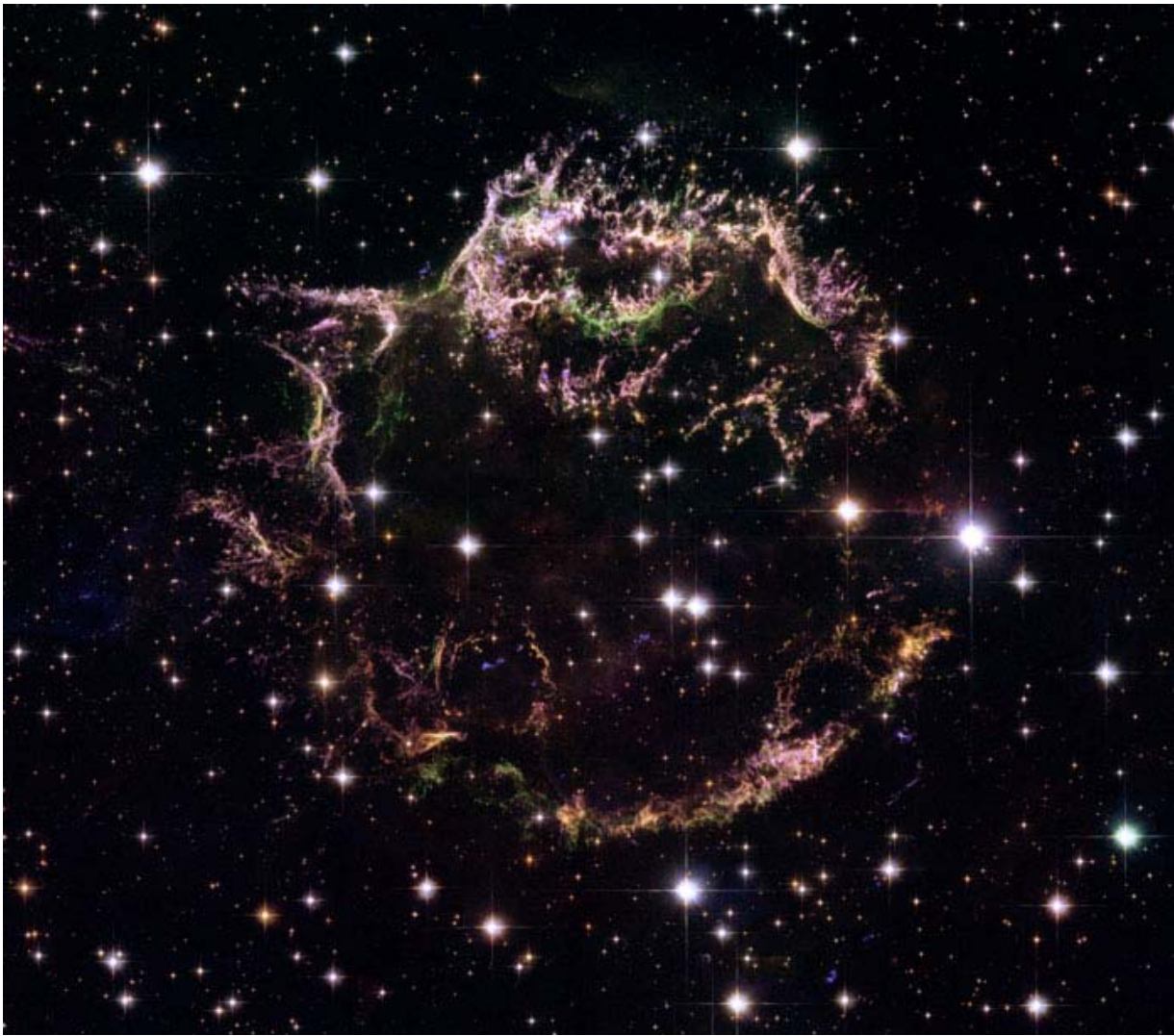


Crédit : Herschel Observatory - ESA

La **nébuleuse « Tête de cheval »** dans le visible (à gauche) et observée en ondes radio millimétriques par la sonde Herschel (à droite)

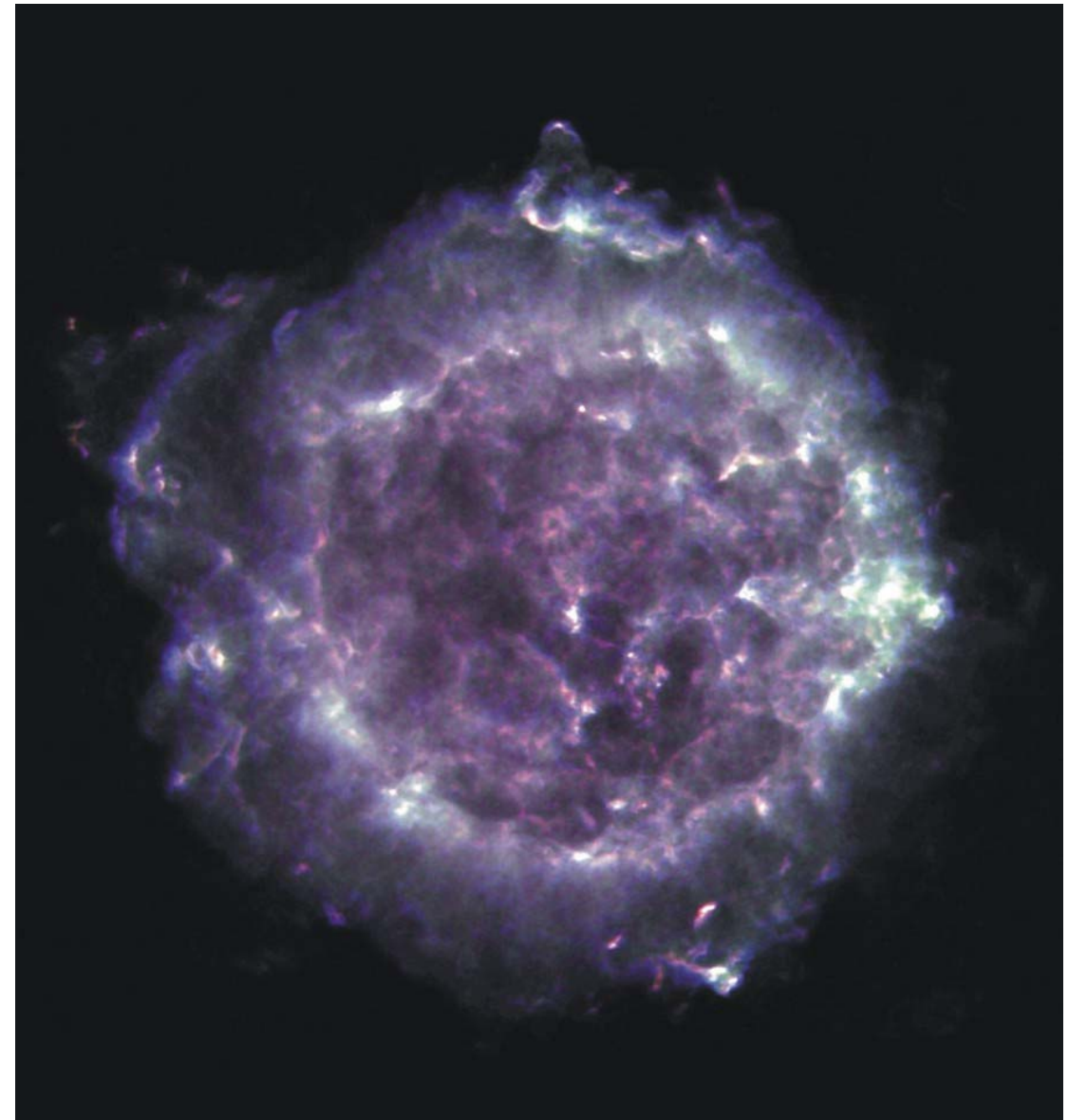
* **l'année-lumière** est une unité de mesure astronomique : c'est la distance parcourue dans l'espace par la lumière en un an.

La radiosource Cassiopée A est le résidu d'une supernova apparue en 1572, et située à 11000 années-lumière du système solaire.



Crédit : NASA / ESA & the Hubble Heritage

Image obtenue par le télescope spatial Hubble à différentes couleurs visibles, représentant différentes espèces chimiques dispersées à la suite de l'explosion de l'étoile.

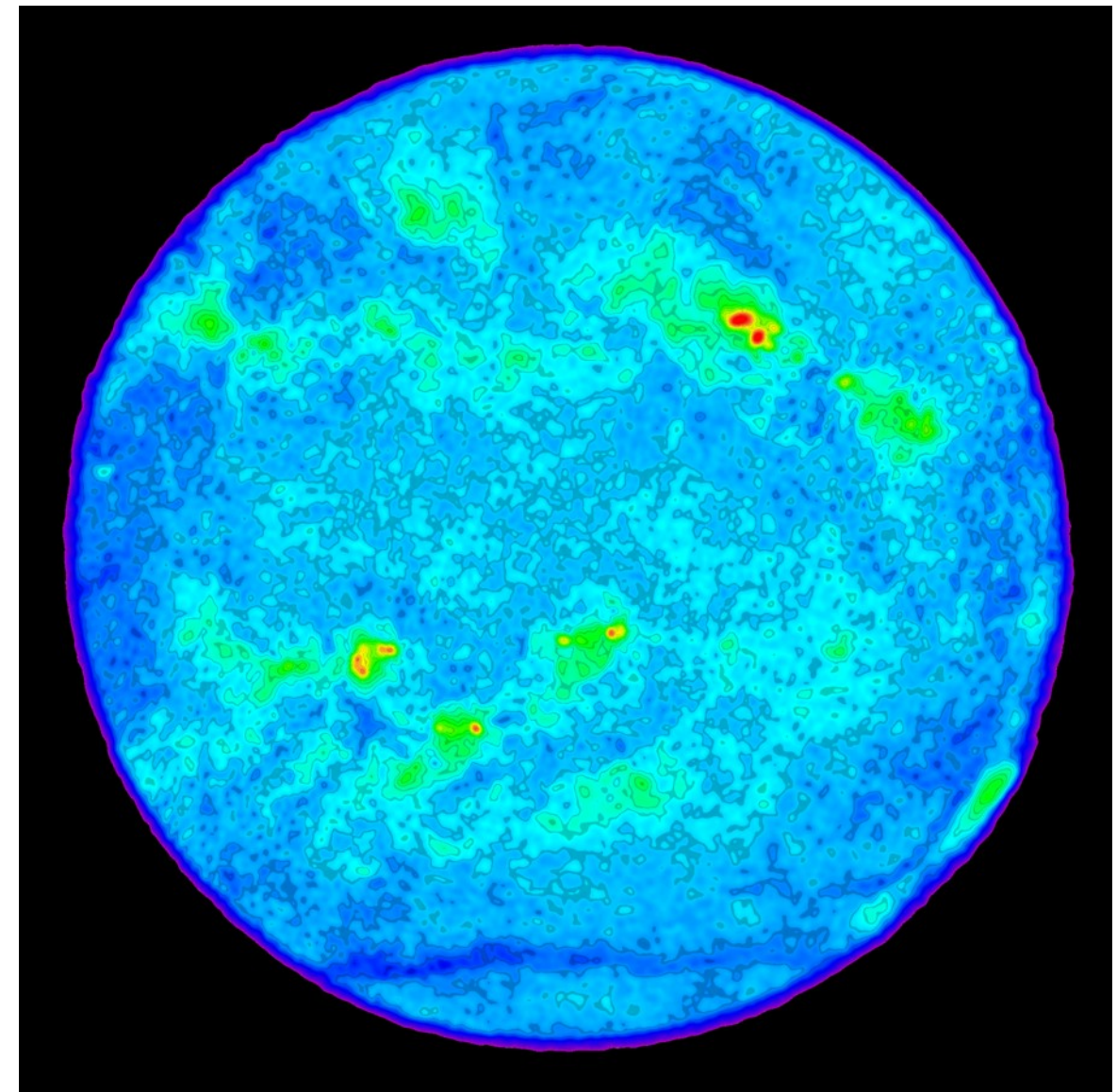
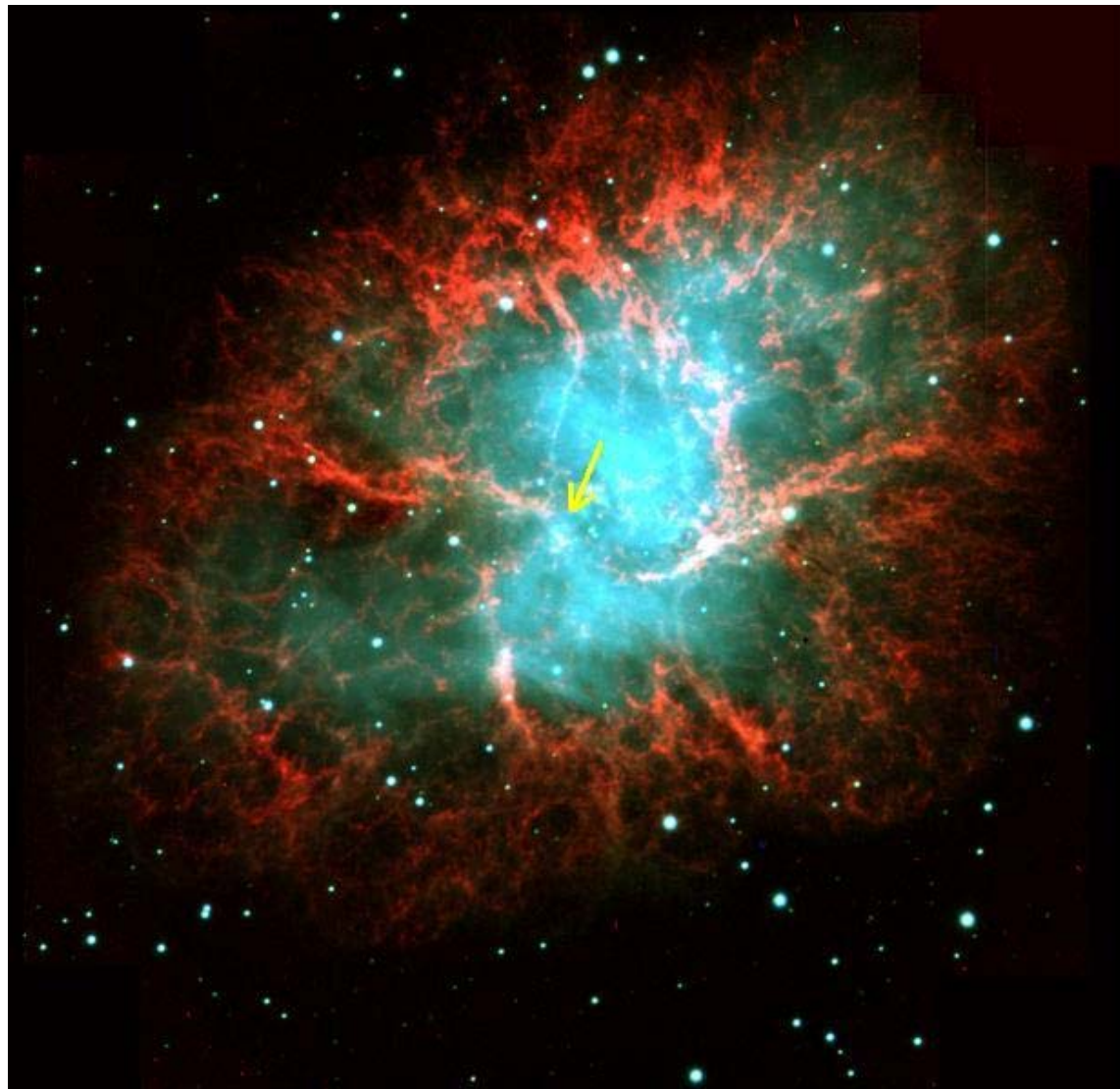


Crédit: NRAO/AUI - VLA

Image radio composite, d'après données VLA à différentes fréquences. Les éjectats produits lors de l'explosion apparaissent sous forme de filaments brillants.

Disque solaire en rayonnement radio à 4.6 GHz.

Résolution de l'image: 12 secondes d'arc, soit environ 8400 km à la surface du Soleil. L'image optique au même instant montre des taches solaires coïncidant avec des détails visibles en radio.



Crédit: NRAO/AUI - VLA

La **nébuleuse du Crabe** (M1) est le résidu d'une supernova observée au XI^{ème} siècle. Elle est située à 6500 années-lumière du système solaire.

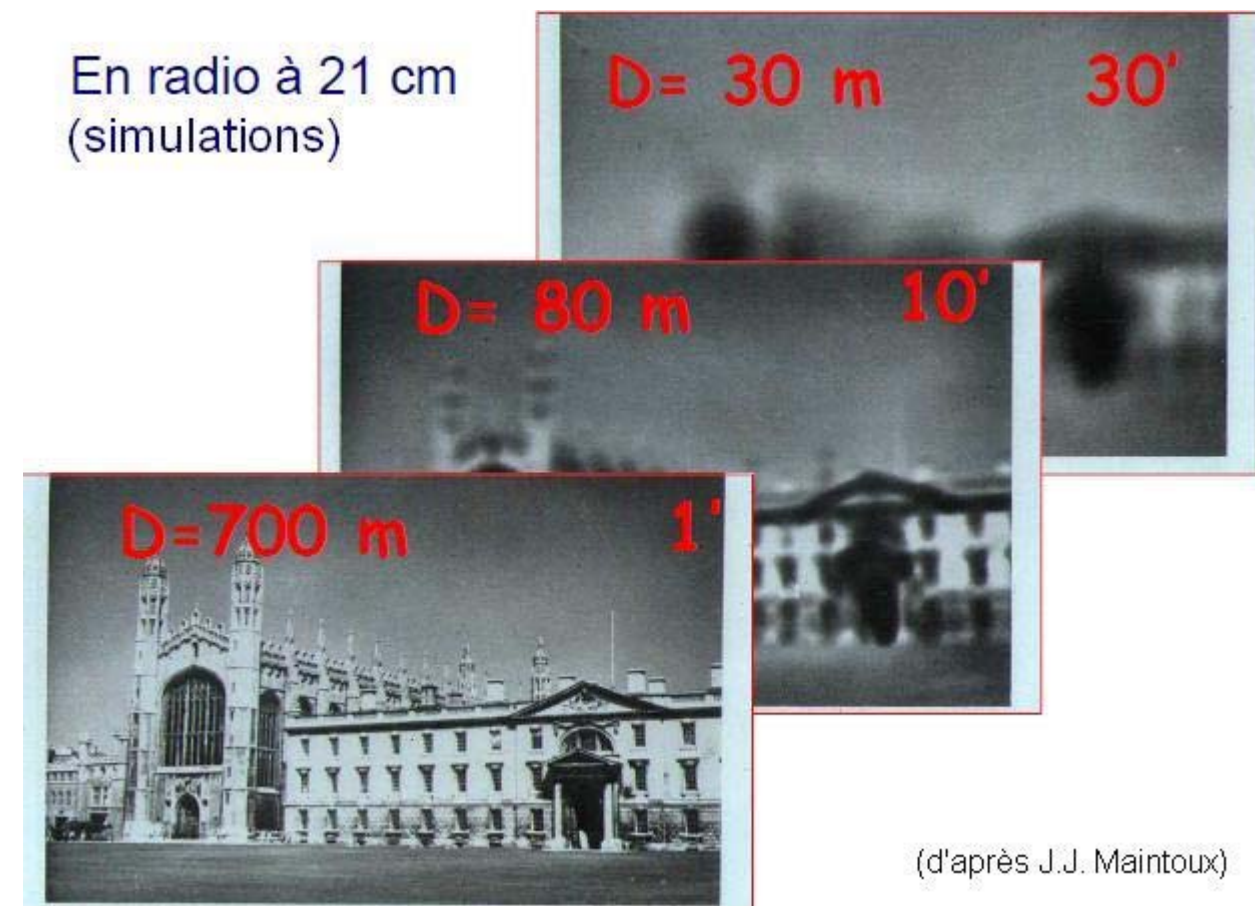
L'image composite dans le visible contient un **pulsar** de période 33 ms, détecté en rayonnement radio (position indiquée par la flèche jaune).

Contraintes de l'observation radioastronomique

les signaux provenant des sources radio célestes sont **très faibles**: il faut de **grandes surfaces d'antennes** pour collecter suffisamment d'énergie, et des **récepteurs à faible bruit** souvent refroidis

la taille des instruments conditionne leur "pouvoir séparateur": il faut de **grands instruments** pour observer des **détails fins** des objets du ciel

Images qui seraient obtenues avec différents diamètres d'antenne D

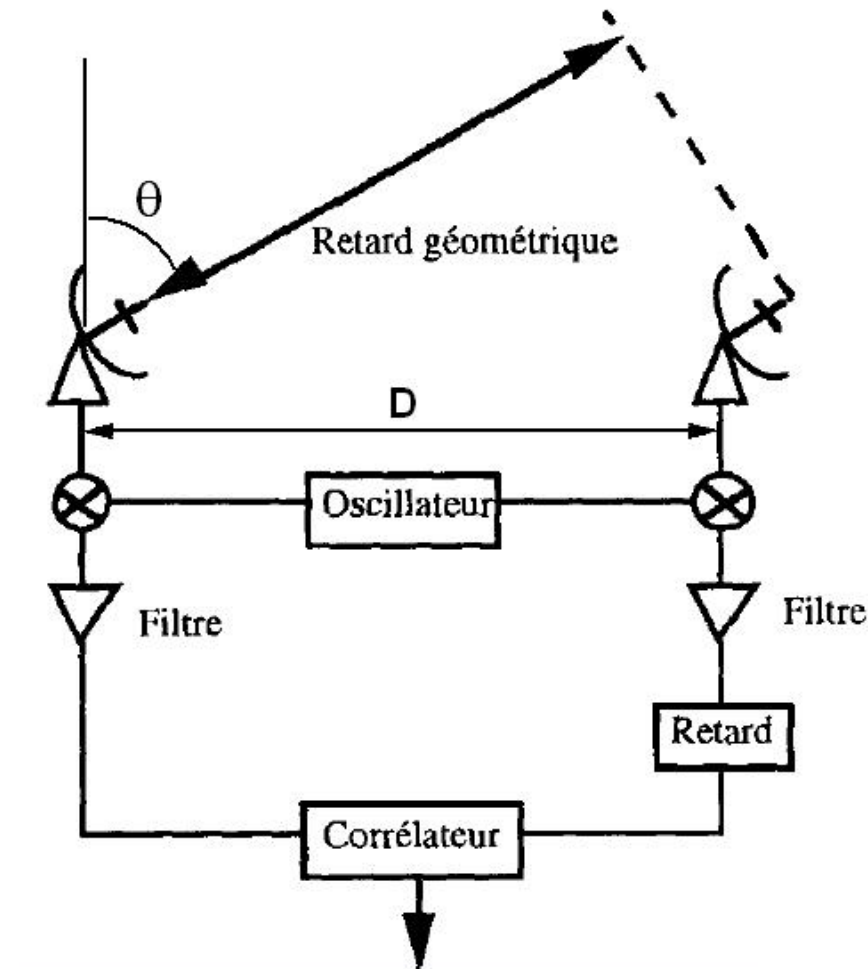


la **pollution radioélectrique** d'origine humaine limite l'usage des bandes du spectre observables -> **bandes réservées** à la radioastronomie, **lutte contre les interférences**, **observatoires spatiaux** éloignés de la Terre

L'interférométrie

Technique permettant d'améliorer la sensibilité et la résolution angulaire en combinant les signaux provenant de plusieurs antennes.

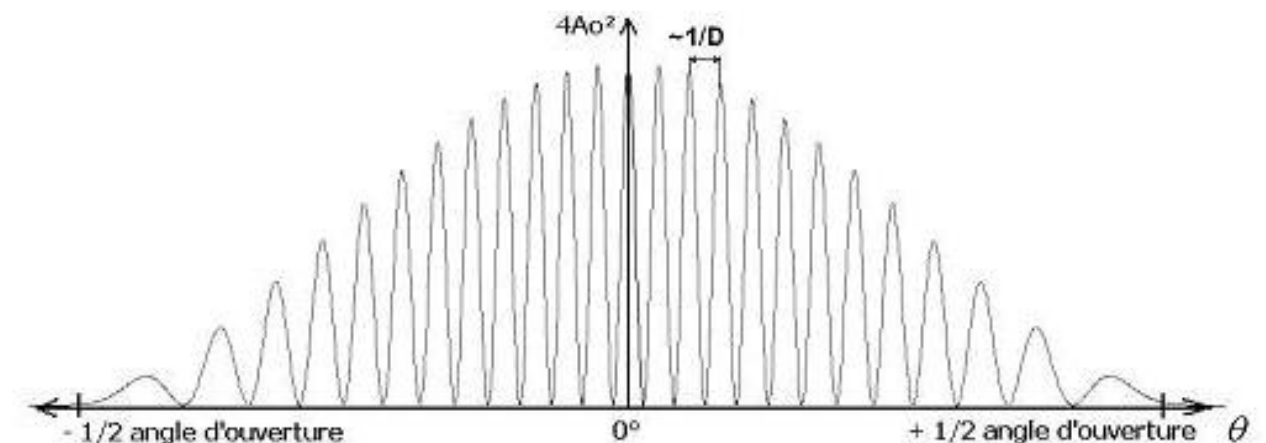
Principe de l'interférométrie (pour 2 antennes) : le retard électronique compense le retard géométrique du signal de l'antenne de gauche, lié à l'angle de pointage θ , et le corrélateur effectue la moyenne du produit des signaux sur une durée longue



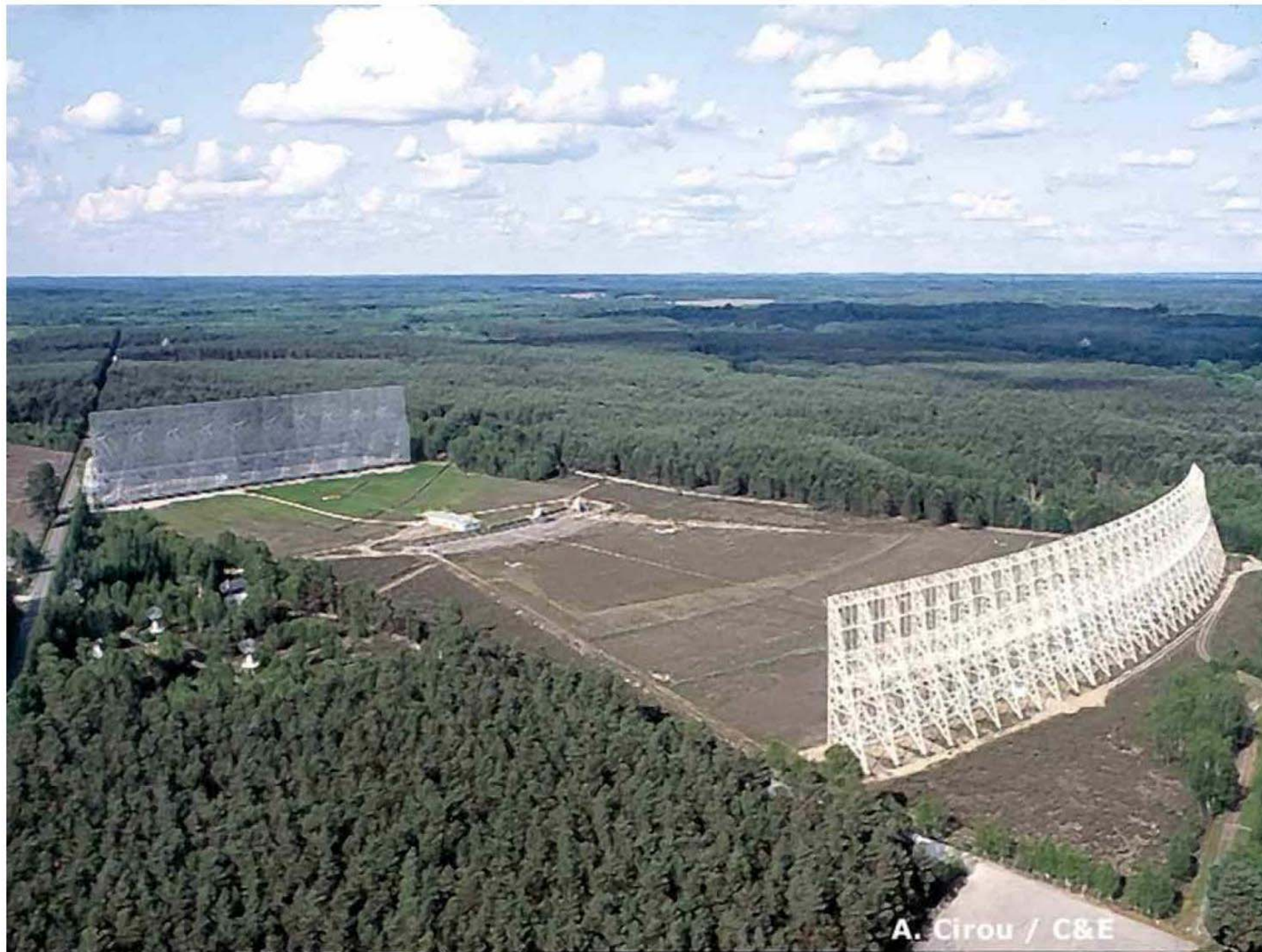
Corrélation entre les sorties des antennes

-> **franges d'interférence**: largeur et espacement $\sim 1/D$ (D : base)

Enveloppe: lobe principal de chaque antenne



Les instruments de la radioastronomie



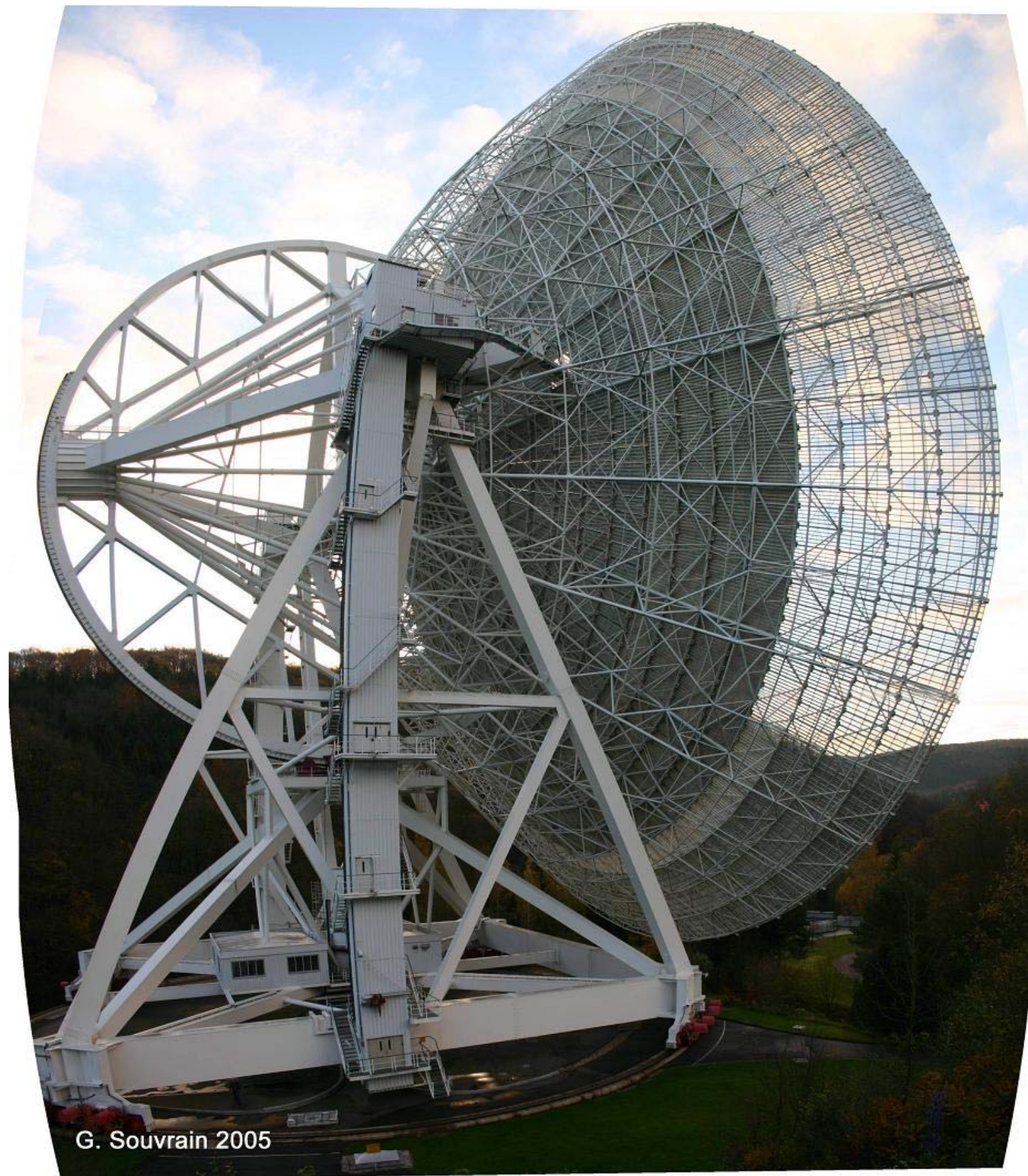
Radiotélescope de Nançay (France), 1957

Surface : 6000 m^2 , réflecteur plan inclinable, observe jusqu'à 3500 MHz

Recherche des pulsars



Radiotélescope d'Arecibo (Porto Rico - NSF USA), 1963
Antenne sphérique fixe diamètre 300m, observe jusqu'à 10000 MHz
Images radar de planètes, pulsars, projet SETI



Radiotélescope d'Effelsberg (Allemagne), 1972

Antenne parabolique totalement orientable, diamètre 100m, observe jusqu'à 80 GHz

Etude de la Galaxie, pulsars, noyaux de galaxies distantes



Observatoire de radioastronomie de Bologne(Italie), 1964
Croix de Mills, longueur des bras 600m, fréquence 408 MHz
Etude des nuages interstellaires, pulsars...



VLA (Very Large Array), Socorro, Nouveau-Mexique (USA), 1980

Interféromètre : 27 antennes de diamètre 25m, extension max 2x21 km et 19 km

Imagerie radio à très haute résolution angulaire : 0,04 " d'arc à 40 GHz

Etude de radiosources éloignées, restes de supernovae, sursauts Gamma, etc



Observatoire de l'IRAM, plateau de Bure (France), 1988

Interféromètre millimétrique : 6 antennes de diamètre 15m sur bases de 760m

Résolution angulaire 0,5" d'arc à 230 GHz ($\lambda = 1,3$ mm) : une pomme à 60 km...

Galaxies, zones de formation d'étoiles, univers primordial (objets très lointains)

ALMA : Atacama Large Millimeter Array (ESO, Chili) - en cours de construction

Interféromètre millimétrique: 64 antennes de diamètre 12m, déplaçables
L'atmosphère très sèche du désert d'Atacama permet l'observation en millimétrique et sub-millimétrique avec une absorption des ondes réduite



Les antennes peuvent être disposées suivant différentes configurations de l'interféromètre pour optimiser l'étude d'imagerie à réaliser

Observations de haute qualité attendues sur objets lointains, formation d'étoiles, exoplanètes, etc



Radiotélescopes du futur



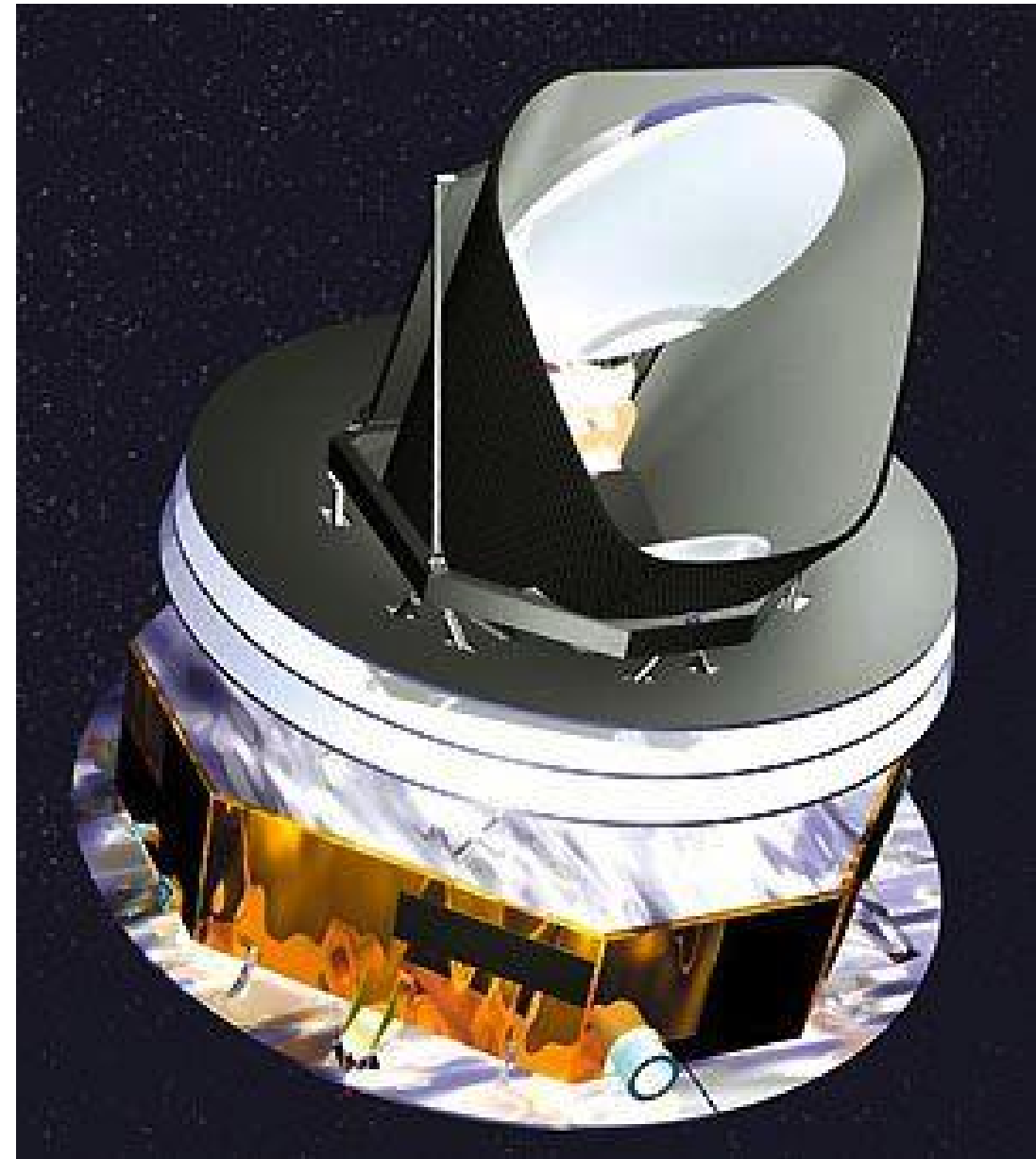
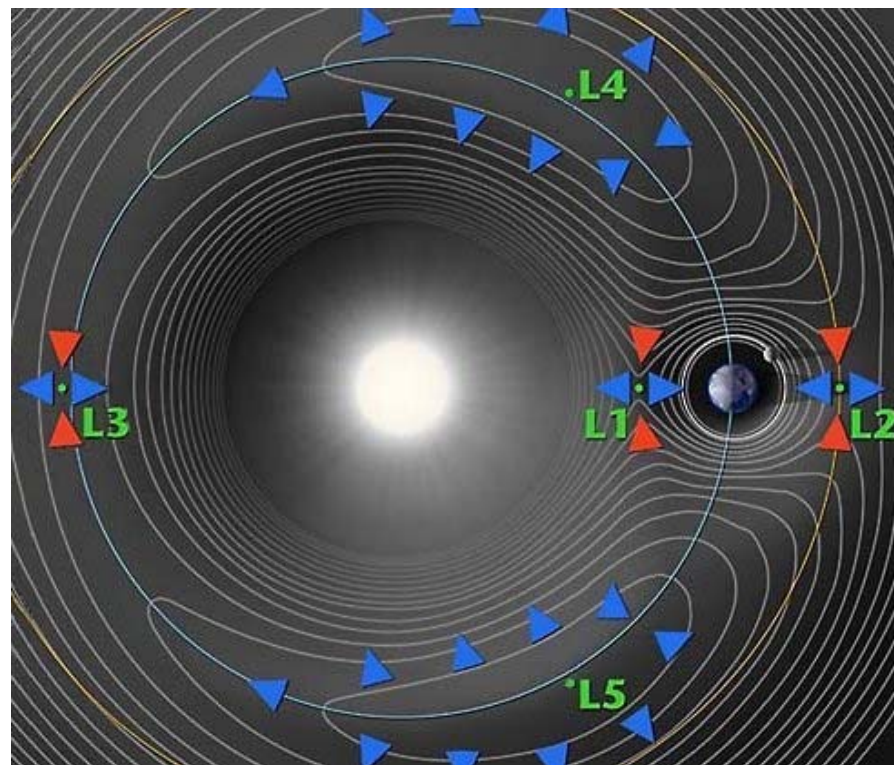
SKA : Square Kilometer Array

Concept : combinaison de « dalles » à multiples dipôles et d'antennes paraboliques conventionnelles pour une sensibilité et une résolution angulaire extrêmement élevées. L'instrument sera réparti sur des centaines de km en Afrique du Sud ou en Australie. Capteurs simples et traitement informatique numérique massif.

Planck : observatoire spatial dédié à l'étude du rayonnement de fond cosmologique à $2,7^{\circ}\text{K}$, « première lumière » émise par l'Univers 380000 ans après le « Big Bang »

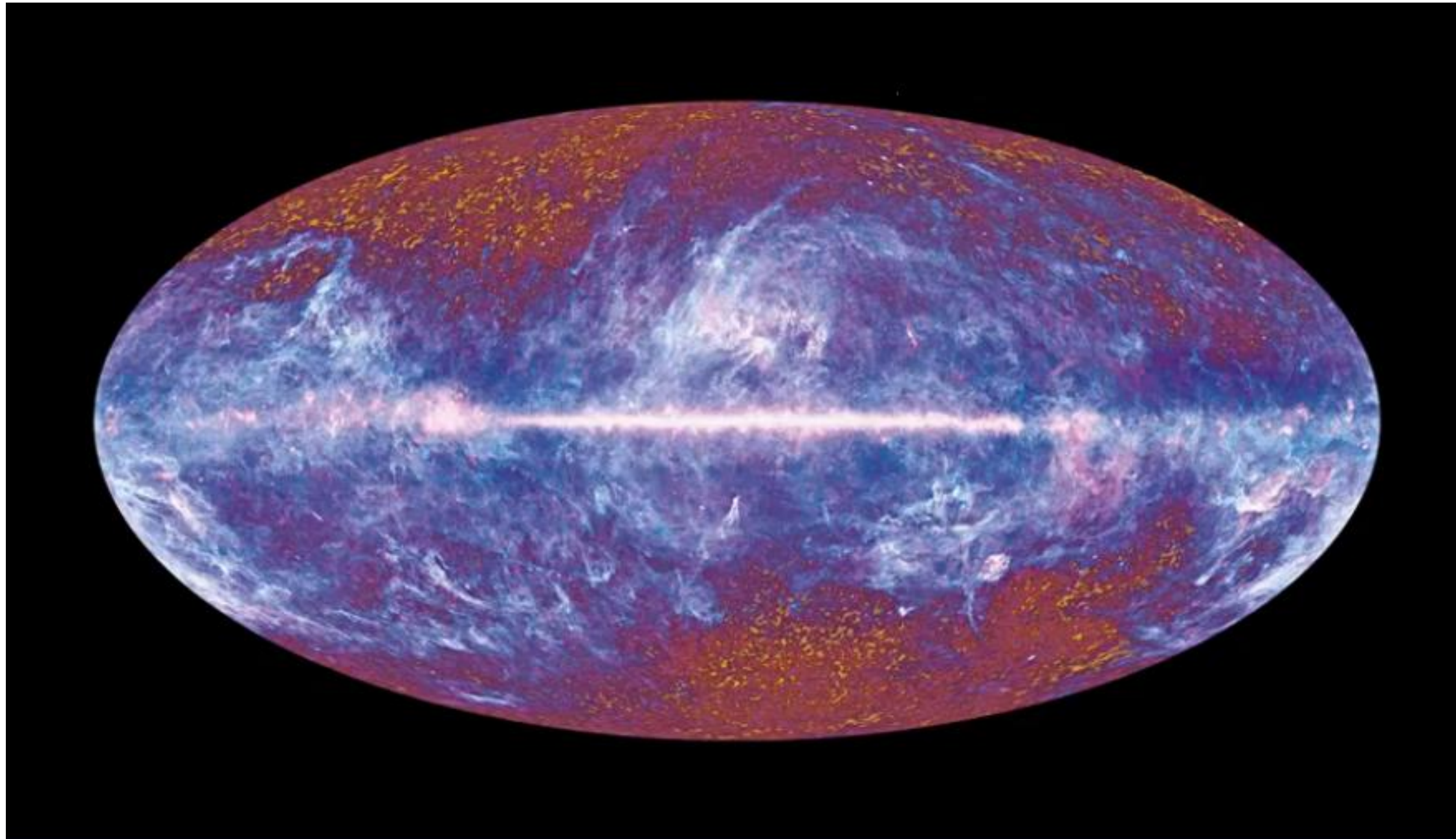
Lancé en Mai 2009, Planck fournit des cartes des anisotropies de température et de polarisation du rayonnement entre 30 GHz (1 cm) et 857 GHz (0.3 mm)

Instrument de très hautes performances: résolution angulaire inférieure à 5 minutes d'arc, sensibilité en température de quelques microkelvins sur l'ensemble du ciel. Durée de vie: 2-3 ans



Planck est positionné au point de Lagrange L2, à 1,5 million km de la Terre

Planck : relevé complet du rayonnement à 2,7°K sur l'ensemble du ciel



Janvier 2011 - réalisé sur 1 an avec l'instrument « Haute fréquence » HFI

Projet d'observatoire de radioastronomie à Pleumeur-Bodou

Projet conduit par l'association
Observation radio - Pleumeur Bodou
sur le site de l'ancien Centre de
Télécommunications Spatiales:

**convertir l'antenne de
télécommunications de 13m PB8 en
radiotélescope décimétrique**

Programme pédagogique : diffusion de
la radioastronomie et de l'astrophysique
vers le public, formation d'étudiants

Programme scientifique d'observation:
rayonnement galactique, pulsars, etc

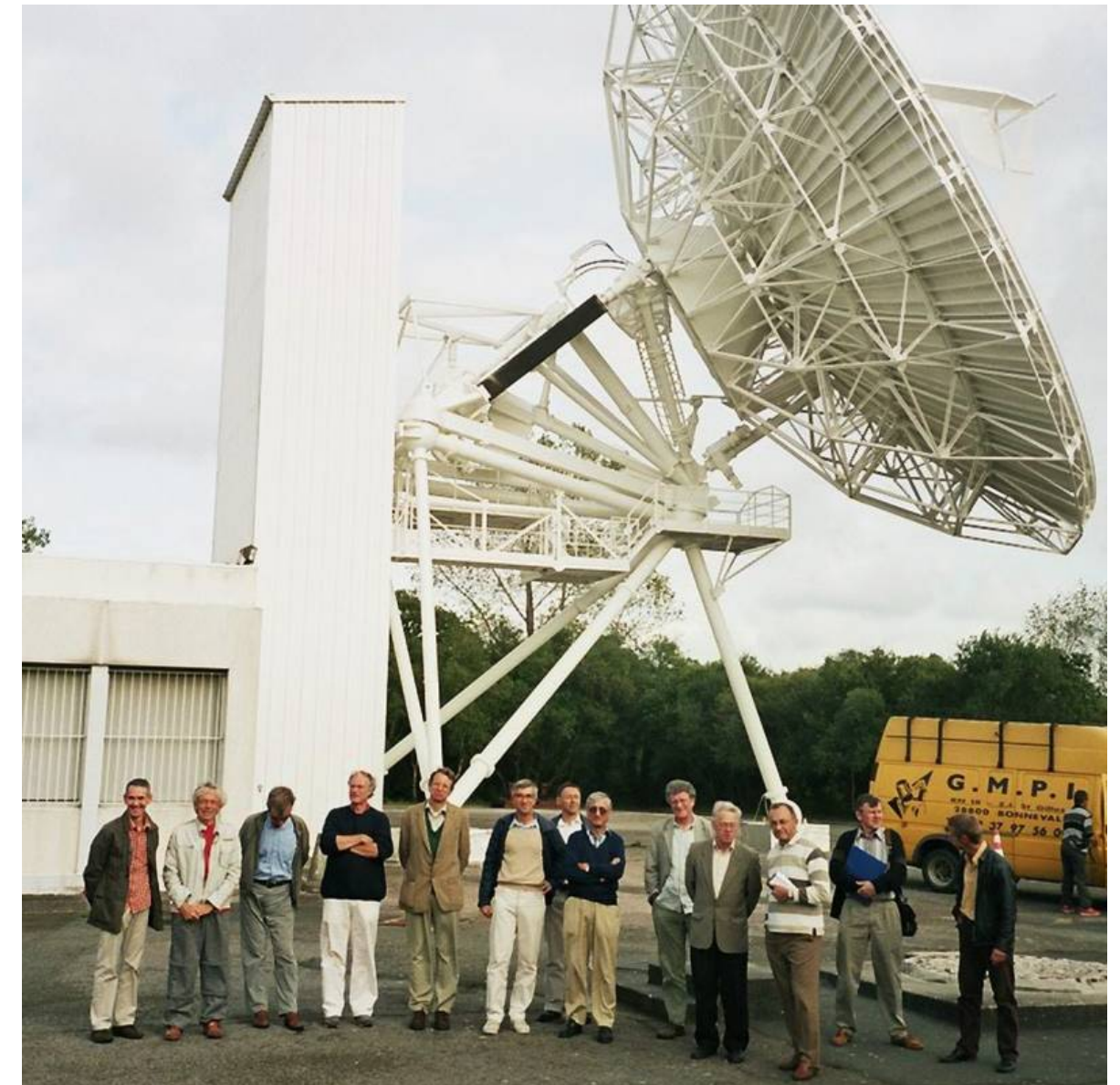
Programme instrumental: lutte contre
les interférences électromagnétiques



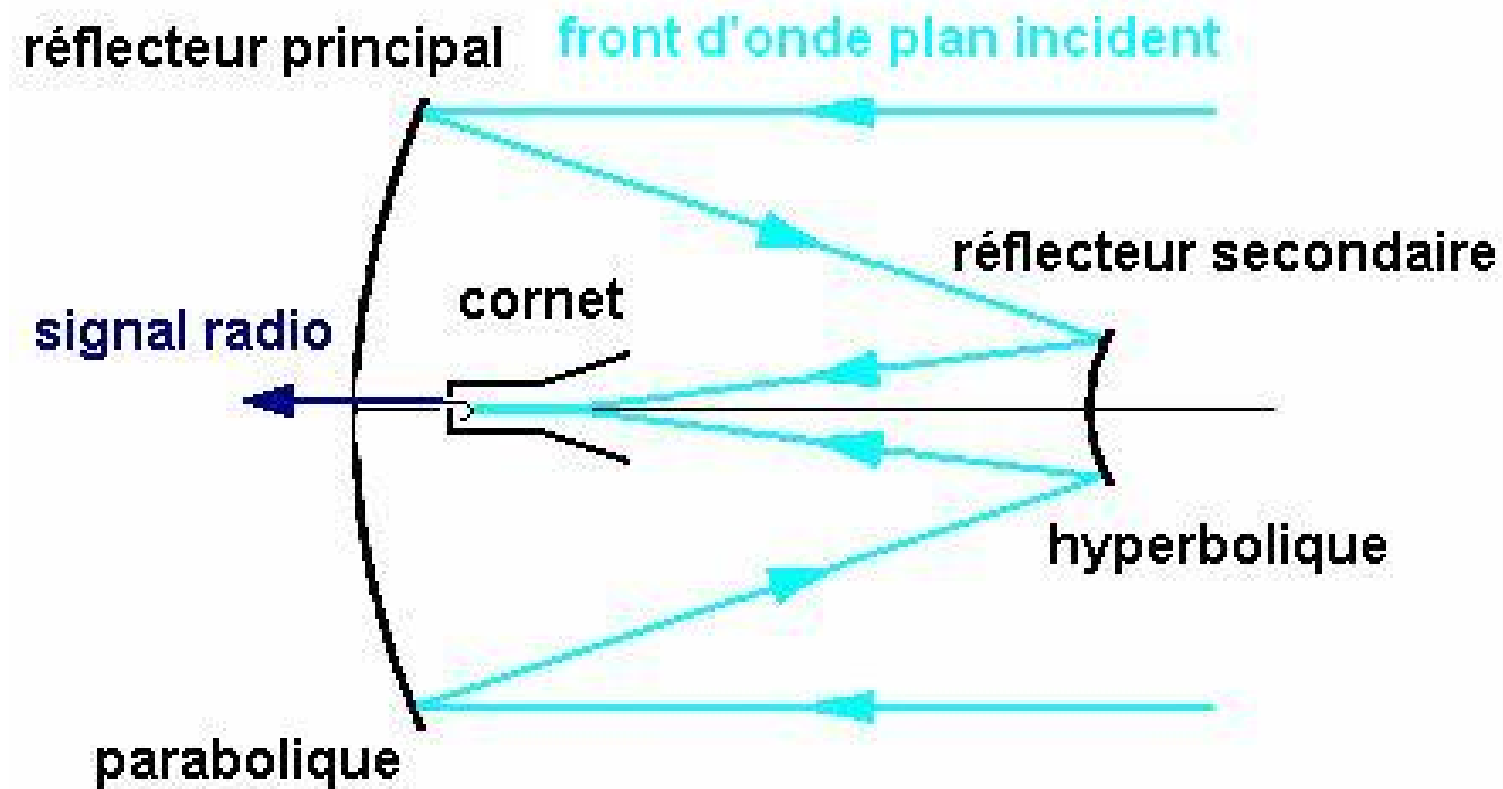
L'Association Observation radio – Pleumeur-Bodou

- Fondée en Mai 2007 (loi 1901), c'est une **association d'amateurs à but pédagogique et scientifique**
- Elle compte une quinzaine de membres: ingénieurs, techniciens, chercheurs, enseignants, astronomes amateurs...
- Elle s'appuie sur un **conseil scientifique** de 5 membres académiques
- **Ses objectifs**: pédagogie pour l'Université, les écoles, le public et les clubs d'amateurs; observations institutionnelles de satellites; contribution à la recherche

Première réunion du Conseil Scientifique, Septembre 2007



Optique de l'antenne de 13m PB8



Optique Cassegrain

Réflecteur secondaire hyperbolique et cornet collectant les ondes radio



L'antenne de 30m PB3 du CTS



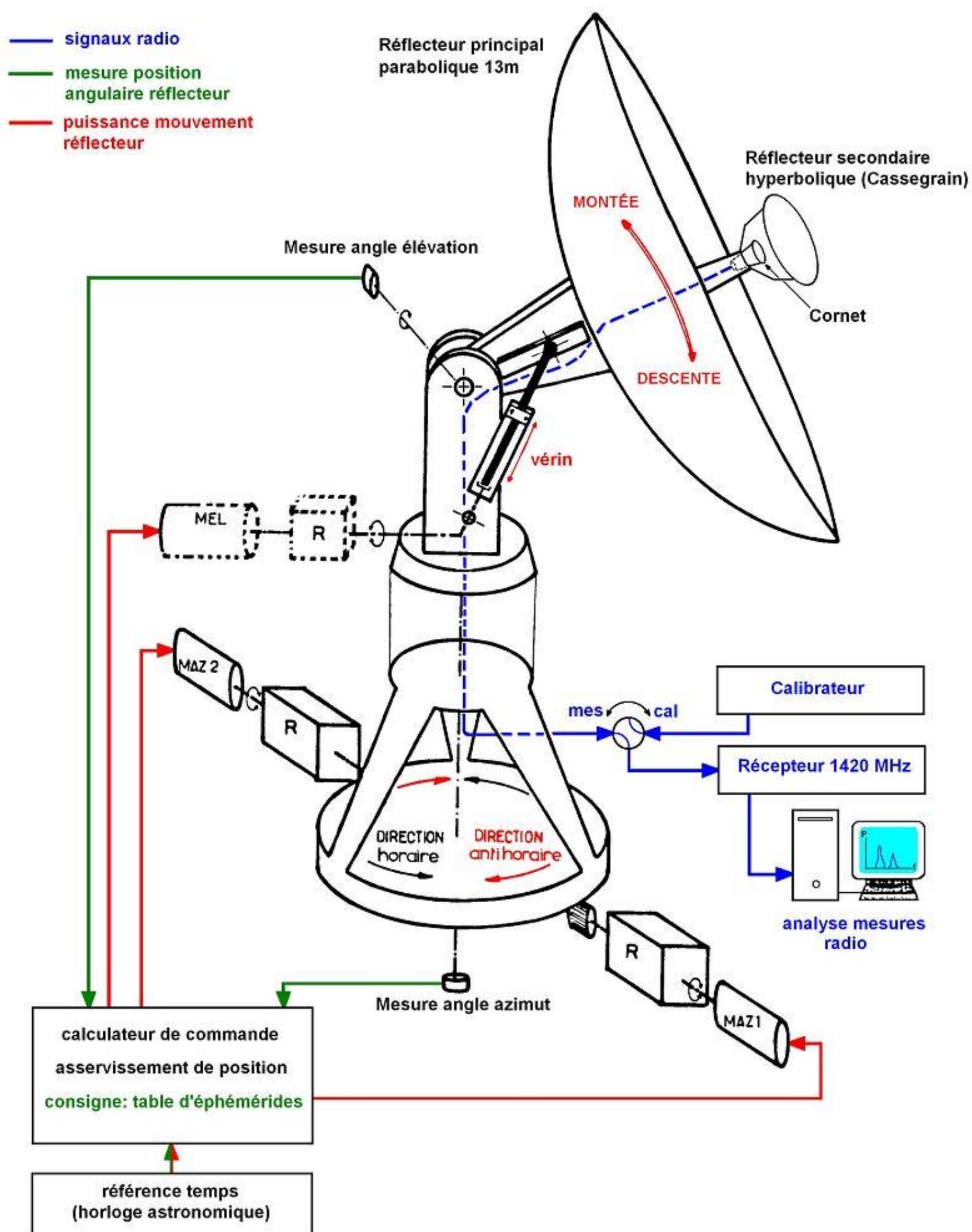
Antenne construite en 1973, de très bonne qualité mécanique

réhabilitation possible en radiotélescope décimétrique à hautes performances

Utilisations possibles :

- étude du rayonnement galactique, pulsars, masers cosmiques...
- communication avec les sondes spatiales : exploration martienne, sonde Rosetta (« atterrissage » sur noyau cométaire prévu en 2014)
- interférométrie à très longue base : en collaboration avec le Centre de radioastronomie de Goonhilly (UK), et intégration dans le réseau mondial d'interférométrie à très longue base (VLBI)

Comment fonctionne le radiotélescope PB8



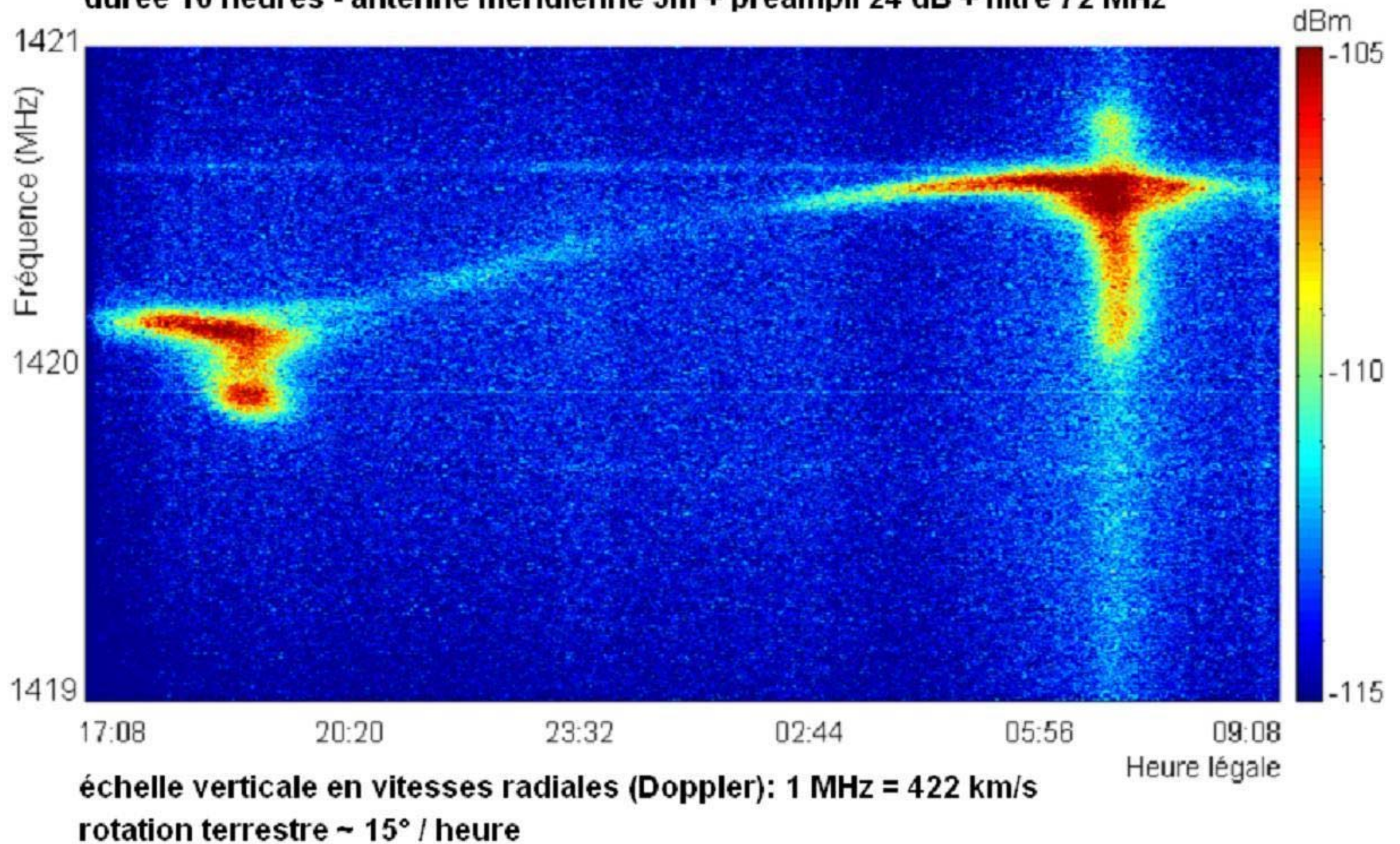
Mouvement du réflecteur sur deux axes (azimut et élévation)
piloté par ordinateur

Récepteur : amplificateur à faible bruit + filtre + spectrographe
(analyseur de spectre)

Deux composantes de polarisation observables

Premiers résultats en radioastronomie

Transit galactique observé à Pleumeur-Bodou les 24 et 25 Mars 2010
Rayonnement de l'hydrogène atomique HI - fréquence centrale 1420 MHz
durée 16 heures - antenne méridienne 3m + préampli 24 dB + filtre 72 MHz

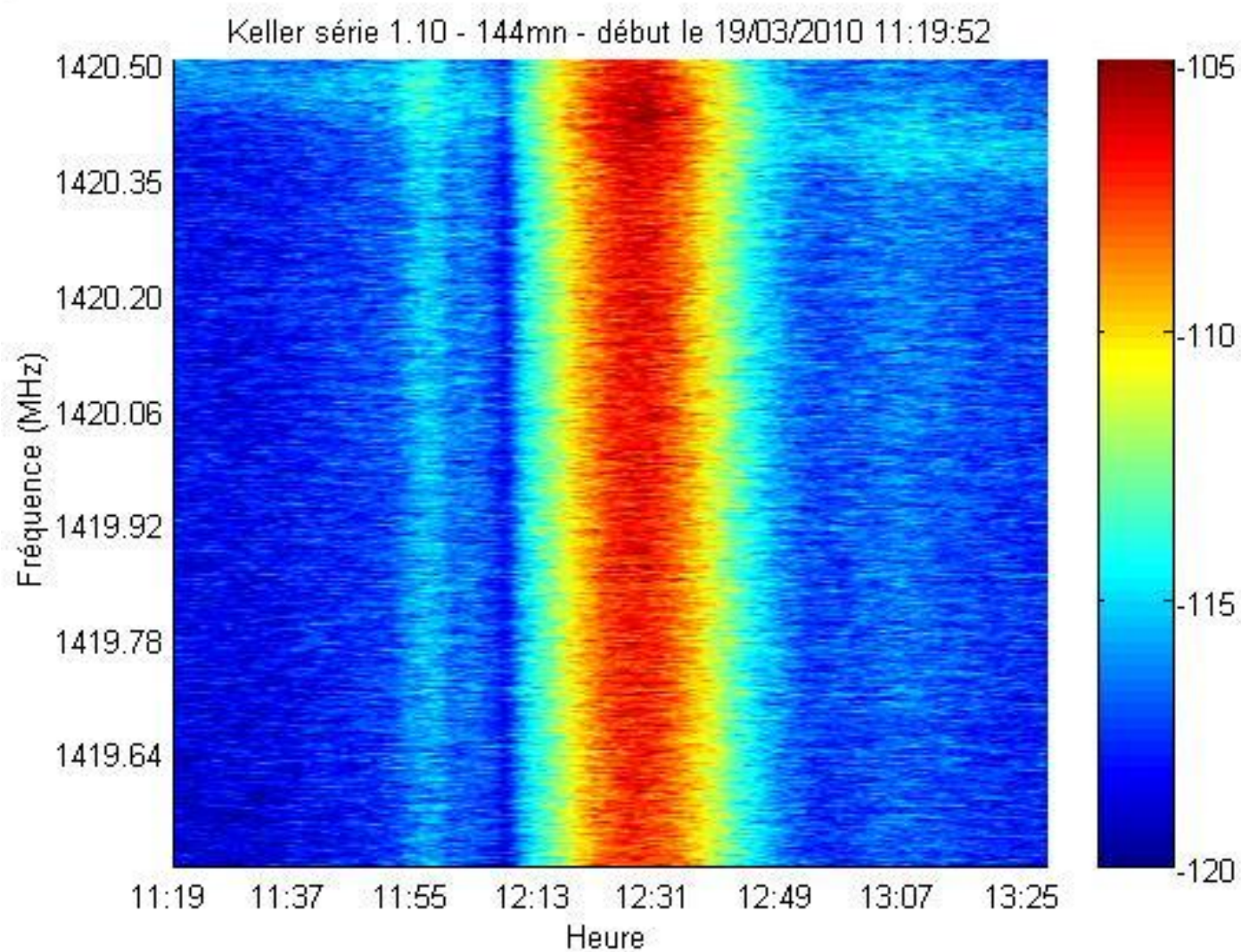


Transit de la Galaxie en rayonnement de l'hydrogène atomique HI (1420 MHz au repos) observé les 24 et 25 Mars 2010 avec une antenne parabolique de 3m à monture équatoriale pointée à $(-10^\circ, +23^\circ)$



« Source » hélicoïdale pour capter les ondes radio à 1420 MHz

Transit du Soleil observé autour de 1420 MHz



Observations intéressantes:

- le Soleil est un puissant émetteur radio à large bande
- la résolution angulaire à 1420 MHz de l'antenne de 3m est de l'ordre de 4° : le Soleil est vu comme un « point lumineux » donc la fonction d'instrument est visible (lobe central et lobes secondaires latéraux)

Expérience facile à réaliser avec du matériel courant :
antenne de réception TV, démodulateur TV et VU-mètre
(radioastronomie d'amateur)