

# La radioastronomie à l'écoute du ciel

Rencontres Astro-Ciel Valdrôme 26 Août 2011

André Gilloire

Association Observation radio – Pleumeur-Bodou

La radioastronomie observe l'Univers dans le domaine des ondes radioélectriques

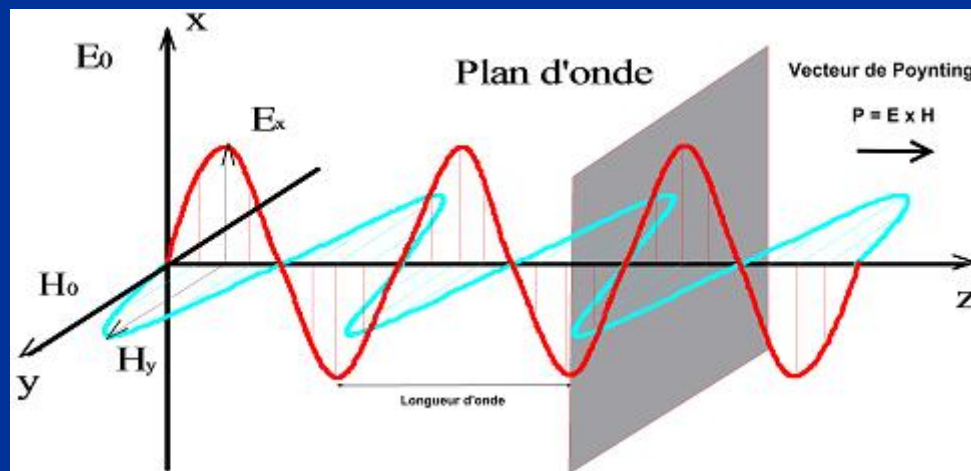
Contrairement à l'astronomie « optique » du visible connue de tous, c'est une « astronomie de l'invisible », comme l'astronomie IR, UV, X et Gamma

Une grande richesse d'informations n'existant pas en visible est accessible en radio: par exemple l'émission des objets "froids" tels que les nuages de gaz interstellaire, où se produisent des transitions atomiques et moléculaires

# Petit détour par les ondes électromagnétiques

Rayonnement électromagnétique = transport d'énergie

L'onde électromagnétique représente le rayonnement comme la propagation conjointe d'un champ électrique et d'un champ magnétique variant périodiquement (Maxwell)



Vitesse de propagation  $c$   
 $\sim 300000$  km/s dans le vide

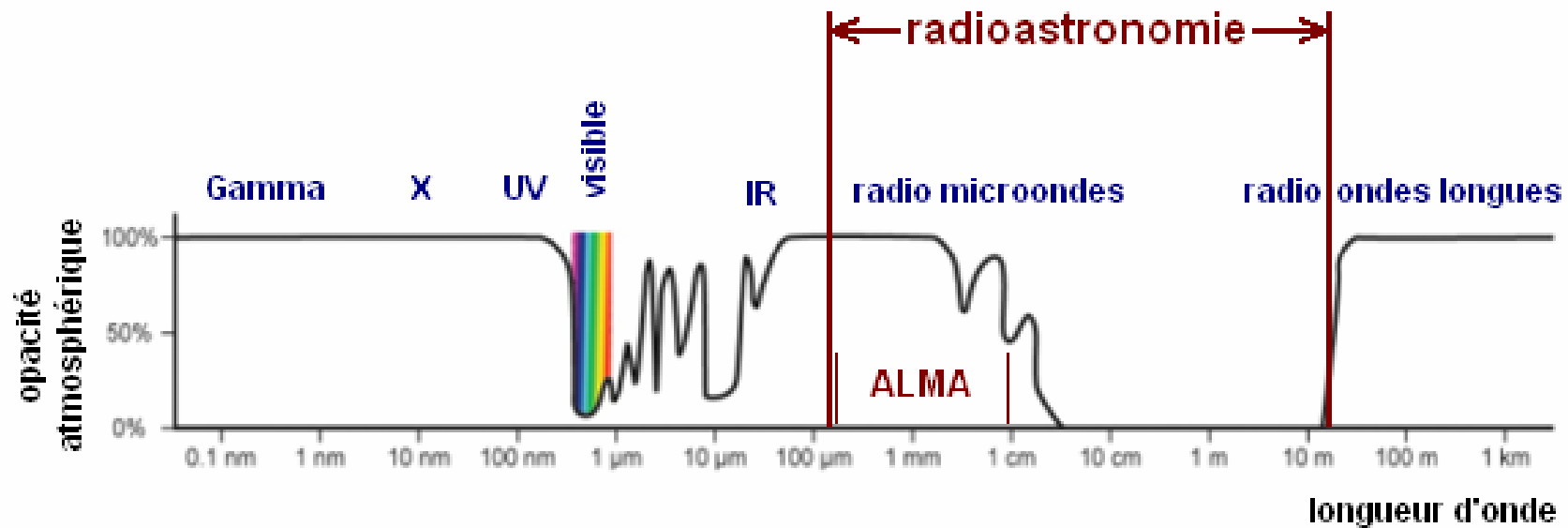
Fréquence  $\nu$

longueur d'onde  $\lambda = c/\nu$

L'énergie électromagnétique est quantifiée: elle est transportée par « grains » ou photons portant un « quantum »  
 $w = h\nu$  (h constante de Planck)

# Les ondes électromagnétiques messagères de l'Univers

L'Univers brille dans le visible et "bavarde" en radio !



le spectre électromagnétique vu au travers de l'atmosphère terrestre

La radioastronomie est une science jeune, née dans les années 1930

Elle a pris son essor après la Seconde Guerre Mondiale grâce aux progrès considérables du radar et des télécommunications

Elle s'est énormément développée grâce aux technologies modernes: grandes antennes et réseaux d'antennes, observatoires spatiaux, nouveaux composants, traitement du signal, informatique...

*La radioastronomie est une « Big Science »*

1932: Karl Jansky (USA) découvre par hasard le rayonnement radio galactique en décimétrique

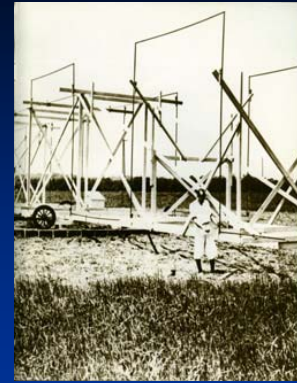
1938: Grote Reber (USA) construit le premier véritable radiotélescope

1950: Doc Ewen (USA) observe le rayonnement galactique à 21cm

1965: Robert Wilson et Arno Penzias (USA) découvrent le rayonnement de fond cosmologique

1967: Jocelyn Bell (GB) observe le premier pulsar

1991: lancement du satellite COBE (COsmic Background Explorer)



# Les mécanismes physiques à l'origine des émissions radio dans l'Univers

- Rayonnement thermique
- Rayonnement synchrotron
- Interactions électron-matière et électron-photon (bremsstrahlung, effet Compton inverse...)
- Oscillations de plasma
- Raies d'émission (et d'absorption) atomiques et moléculaires

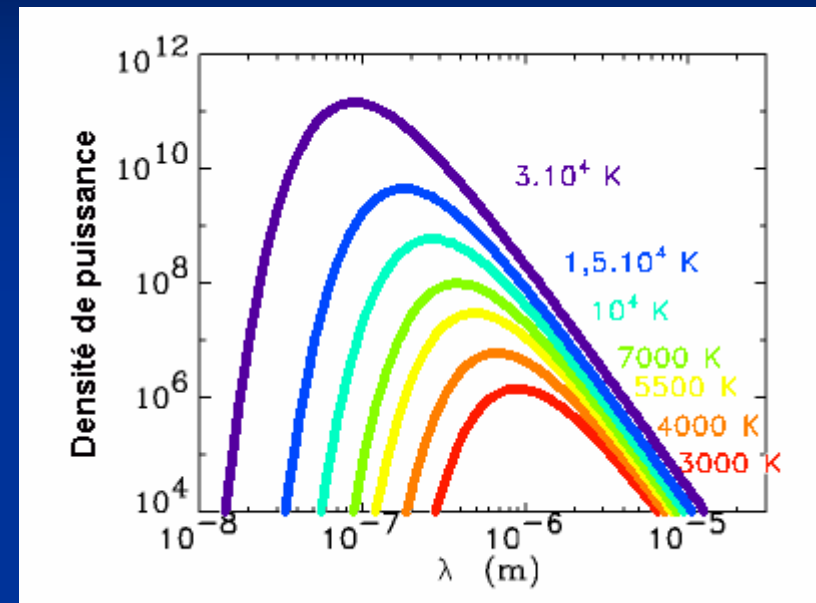


# Rayonnement thermique

- équilibre thermique:  
rayonnement du corps noir



Source: CADC

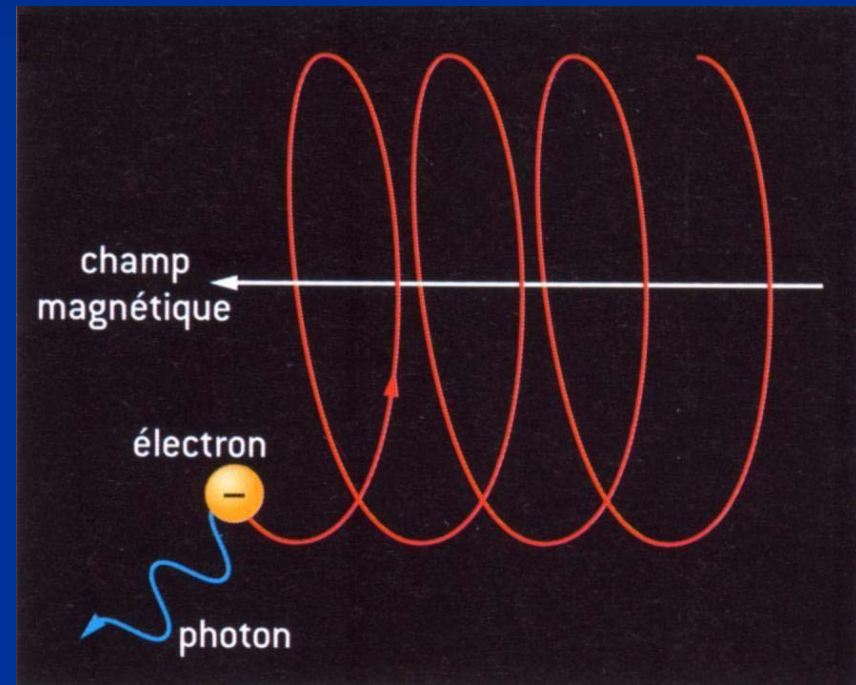


- gaz et poussières chauffés  
par le rayonnement au voisinage  
d'étoiles en formation ou par effet  
de friction dynamique
- rayonnement de fond cosmologique à  $2,7^\circ\text{K}$



# Rayonnement synchrotron

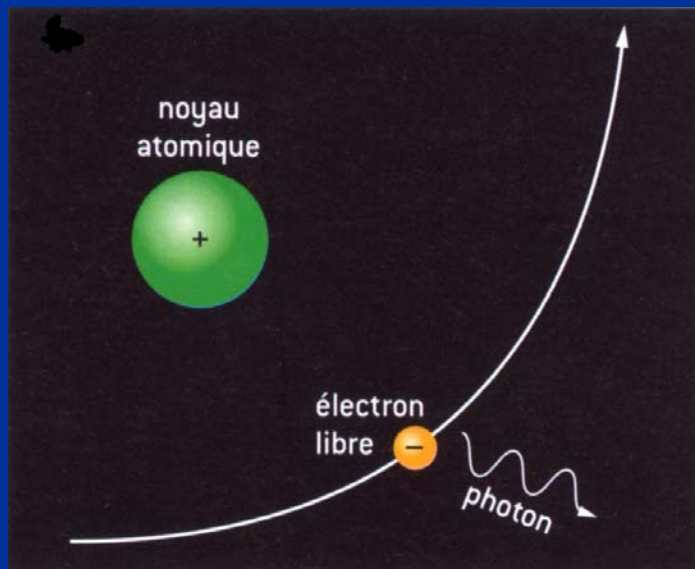
le milieu interstellaire contient des gaz ionisés ou *plasmas* et des champs magnétiques; les électrons libres provenant des atomes ionisés spiralent autour des lignes de champ et rayonnent des ondes radio



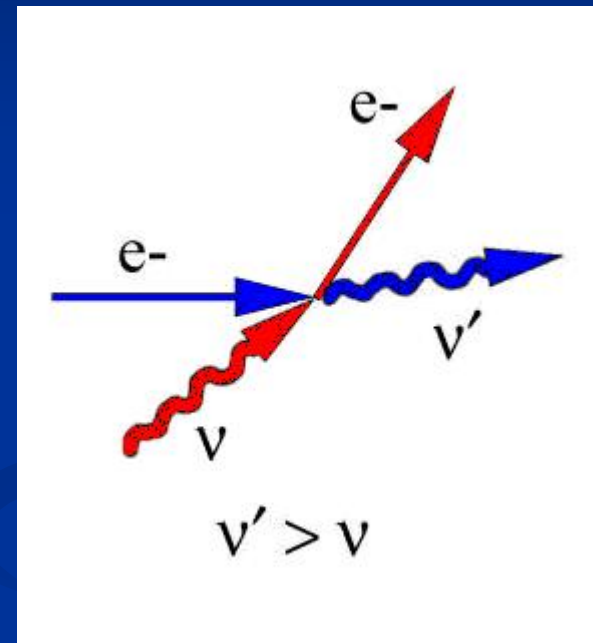
Source: Y. Nazé, *Les Couleurs de l'Univers*

# Interactions électron - matière et électron - photon

## Rayonnement de freinage



Source: Y. Nazé, *Les Couleurs de l'Univers*



Source: Venables et Coll., Arizona State University

## Effet Compton inverse

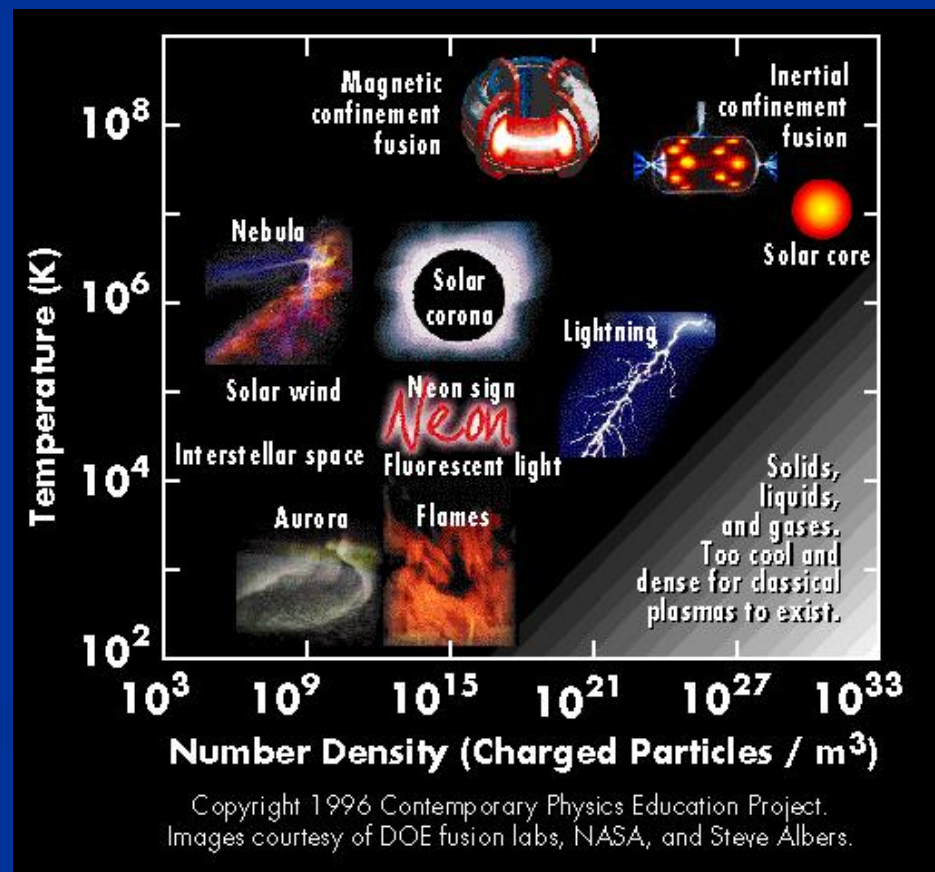
important en cosmologie  
(élargissement du spectre CMB)

# Oscillations de plasma

Les nuages interstellaires, les atmosphères d'étoiles, des couches atmosphériques planétaires (ionosphère terrestre) sont formés de gaz partiellement ionisés qui constituent des **plasmas**

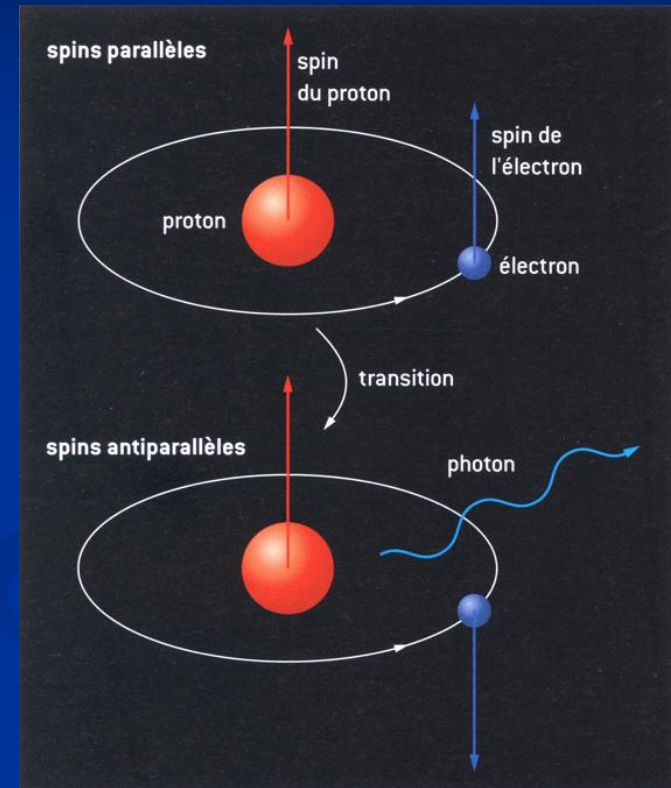
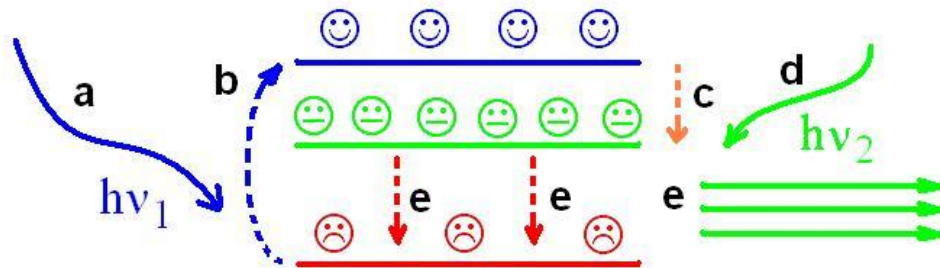
Les interactions entre plasma et ondes électromagnétiques et aussi entre plasma et électrons en mouvement produisent des oscillations, sources de rayonnement électromagnétique à large bande

Il en résulte aussi que le plasma est un milieu dispersif -> incidence sur la mesure des distances des radio-sources (pulsars)



# Raies d'émission et d'absorption

changements d'état d'énergie des atomes et molécules présents dans le milieu interstellaire: HI, OH, CO, NH<sub>3</sub>, etc → **signature radio** caractéristique, permet d'identifier les espèces chimiques et de quantifier leur abondance



Source: Y. Nazé, *Les Couleurs de l'Univers*

émission stimulée: masers  
(OH, CO, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>...)

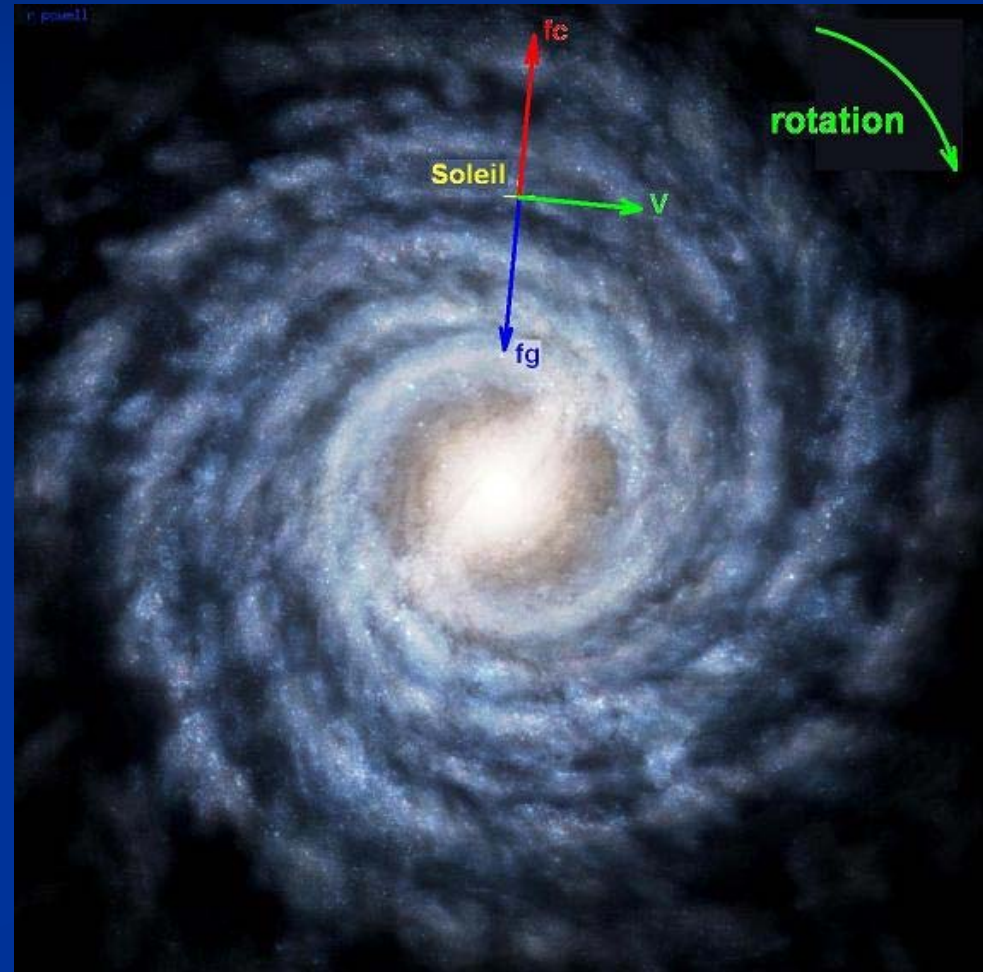
# Observations radioastronomiques: des exemples typiques

- Rayonnement galactique HI à 21cm
- Pulsars
- Soleil et Jupiter
- Fond microonde cosmologique



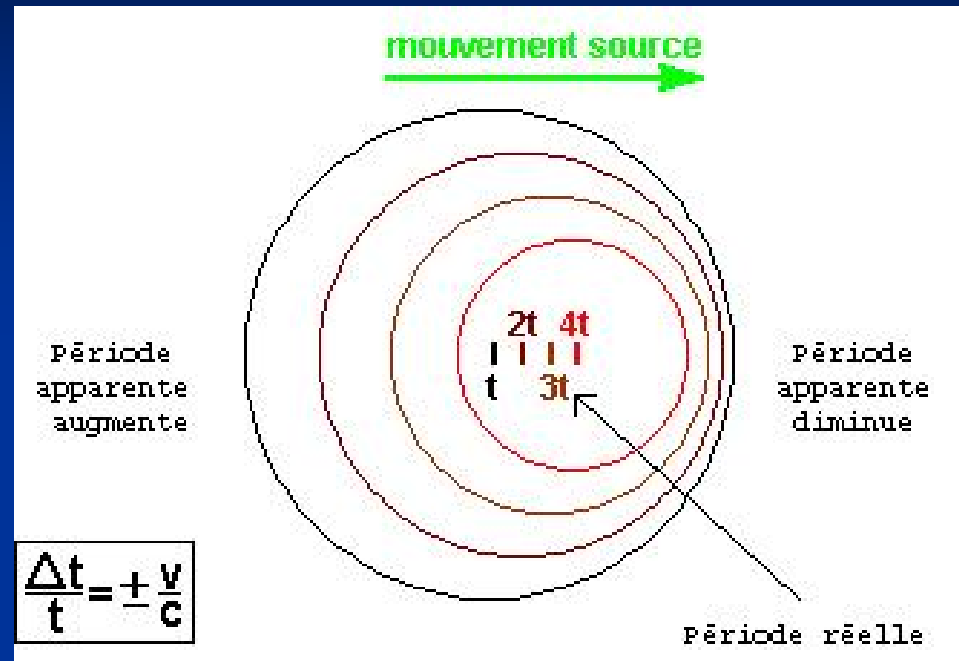
# rayonnement galactique HI (hydrogène atomique) à 21cm

Problème: mesurer la  
dynamique de  
rotation de notre  
Galaxie



Source: Atlas of the Universe (vue d'artiste)

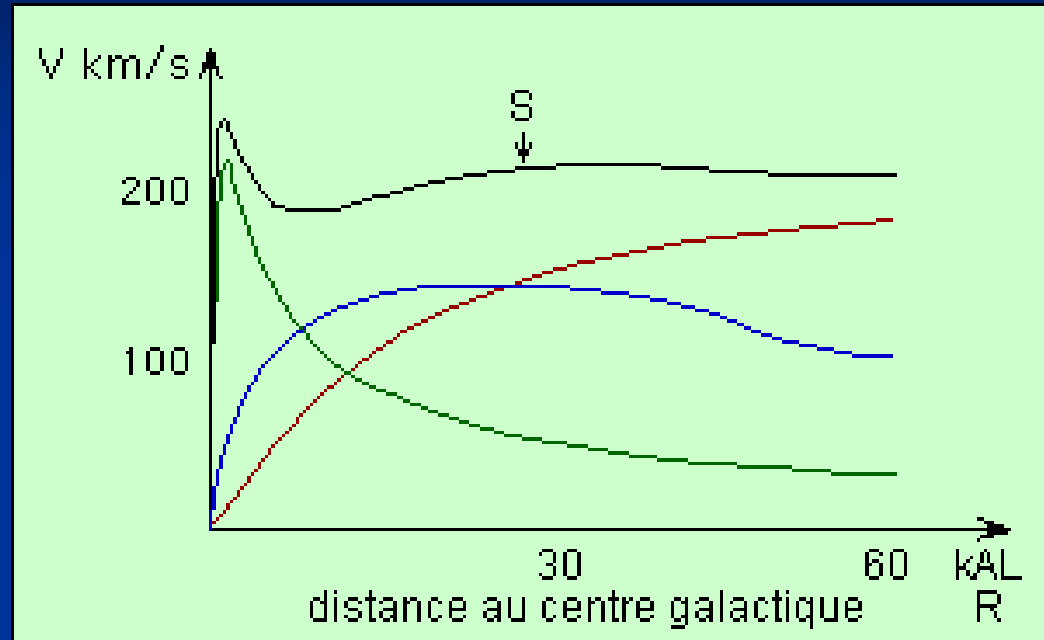
Outils : émission HI à  
21cm / 1420 MHz  
(transition de spin)  
+ effet Doppler



Intérêt de l'émission HI: grâce à sa grande longueur d'onde, elle traverse les nuages de poussière qui nous cachent une grande partie de la Galaxie

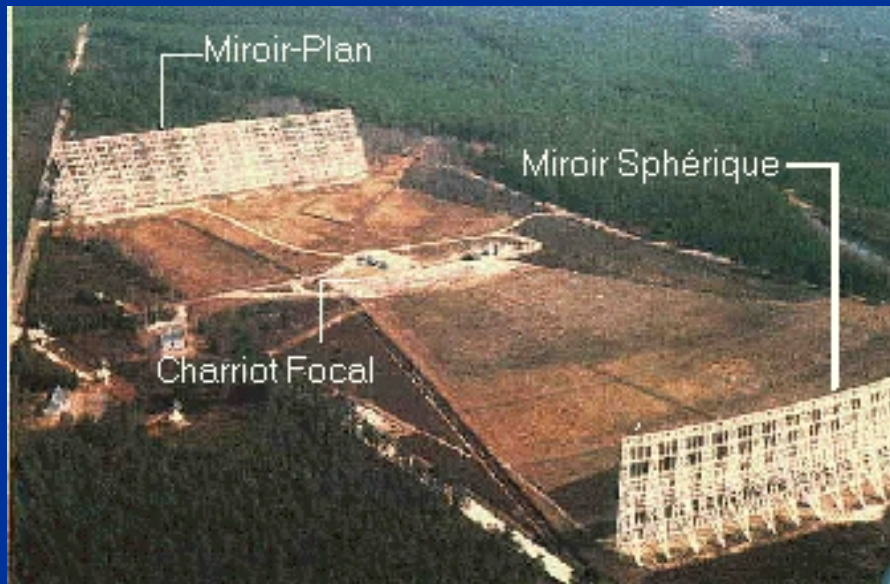


Résultat: courbe de vitesse -> évidence de présence de **matière noire** dans notre Galaxie

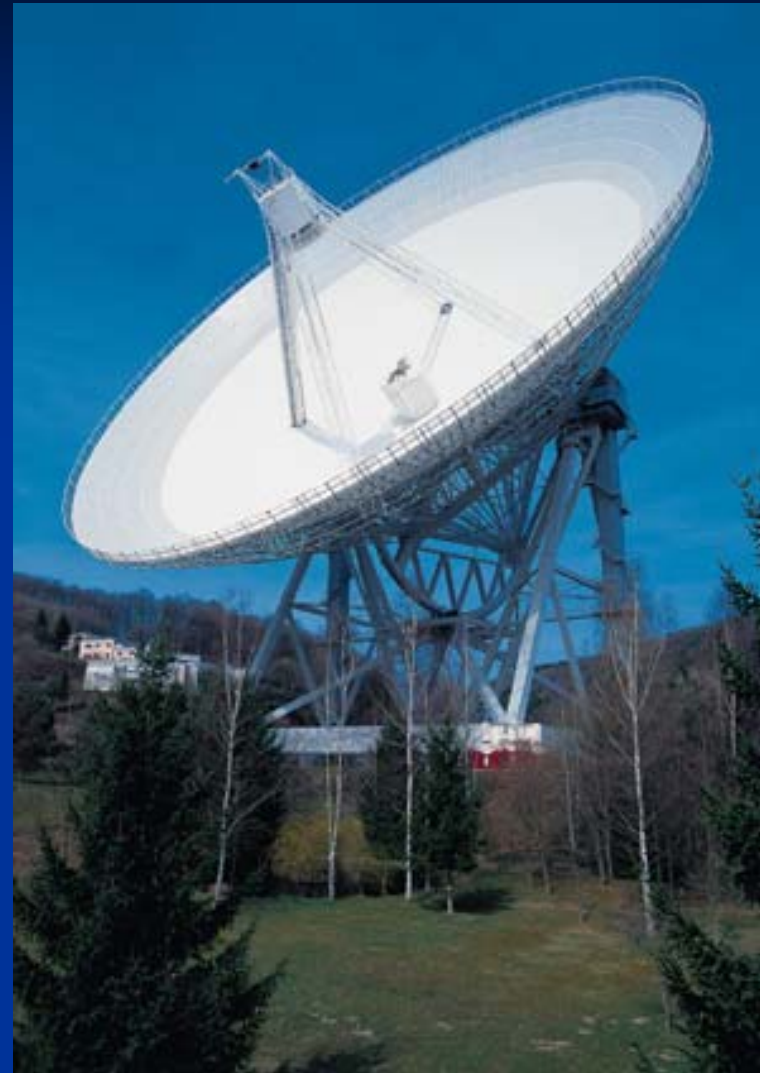


Observations semblables dans beaucoup d'autres galaxies (découvertes dans le visible par Vera Rubin)

# Observer la Galaxie avec les grands radiotélescopes



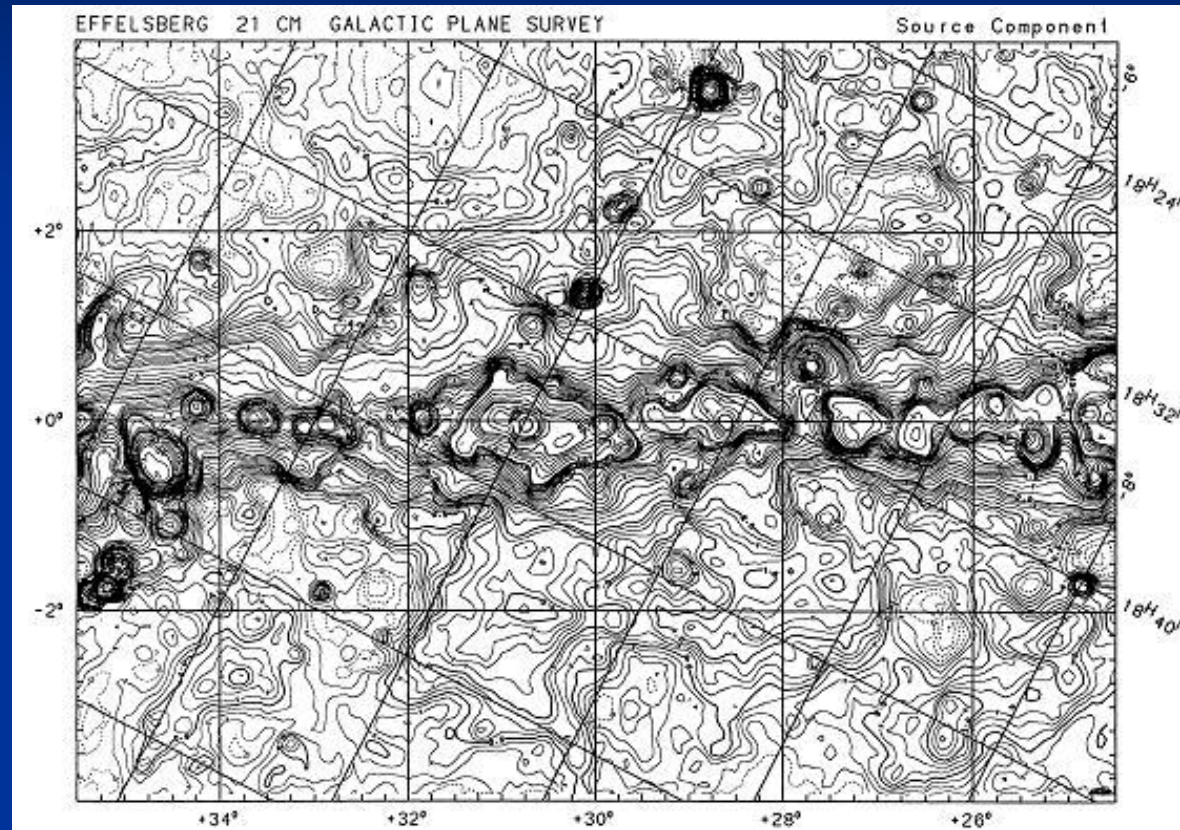
Nançay 200m et 300m



Source: Max Planck Institut Für Radioastronomie

Effelsberg 100m

# Carte d'émission galactique à 21cm

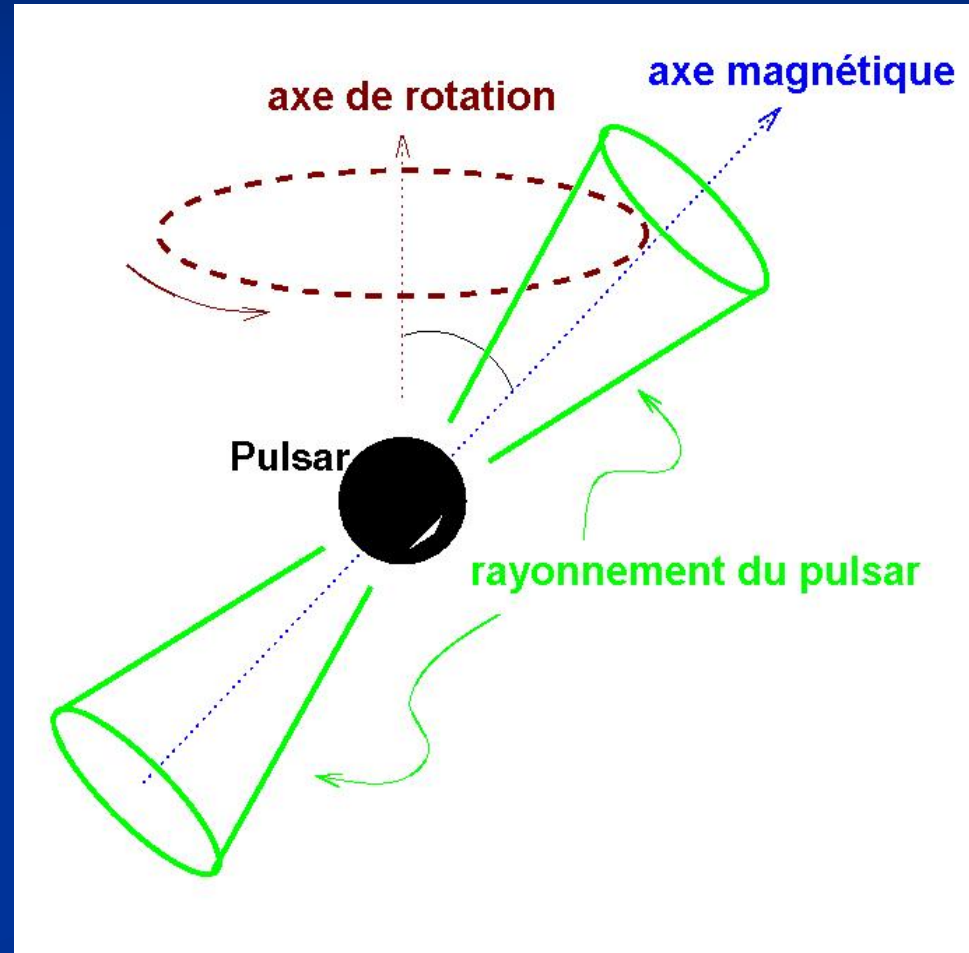


Le radiotélescope fournit une **carte des émissions radio** par balayage et série de mesures de l'énergie du signal sur des durées dépendant du RSB

# Observation des pulsars

Résidus d'étoiles massives ayant explosé (supernovae)  
émission synchrotron intense et focalisée:  
"phares cosmiques"  
très stables

Il y en a beaucoup dans notre Galaxie (et dans les autres)



Emission large bande: typiquement  $\sim 100$  MHz à  $\sim 10$  GHz



# Pulsar du Crabe (M1)

Supernova observée au  
XI<sup>ème</sup> siècle

Distance 6500 AL

Période 33ms

« Écouter » un pulsar...

PSR 0833-45 (Vela)

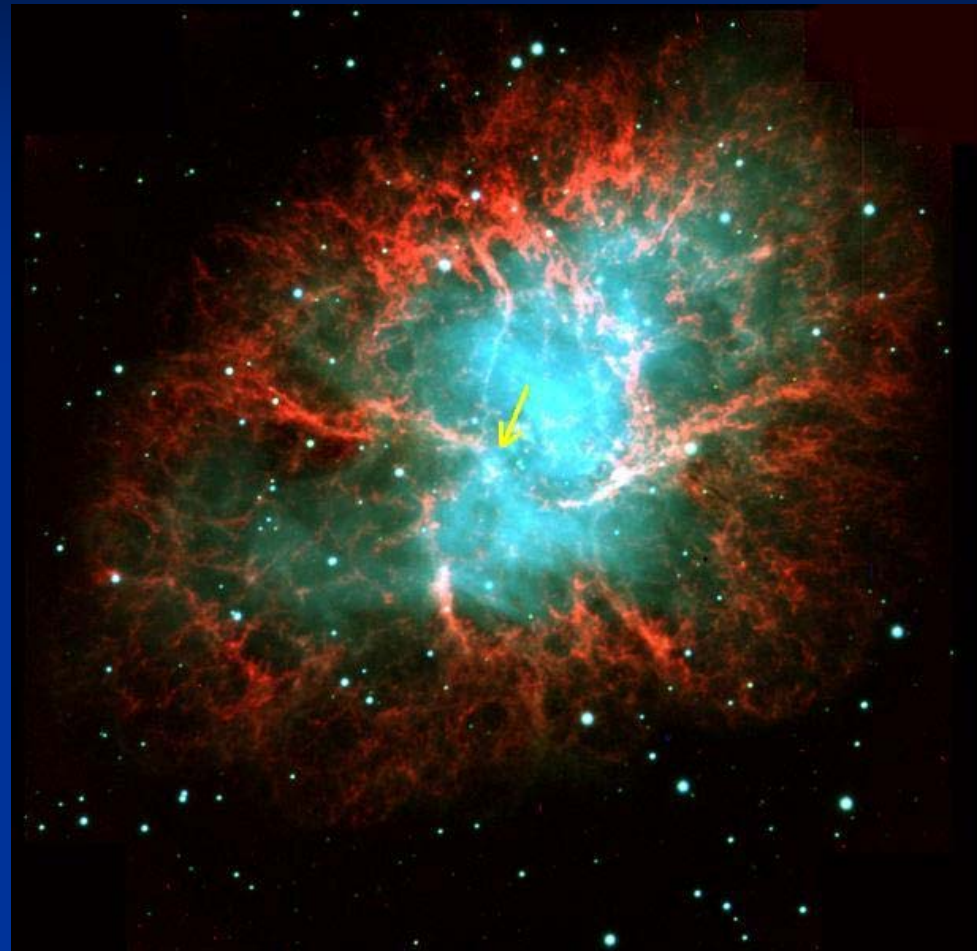
Période: 89.3ms



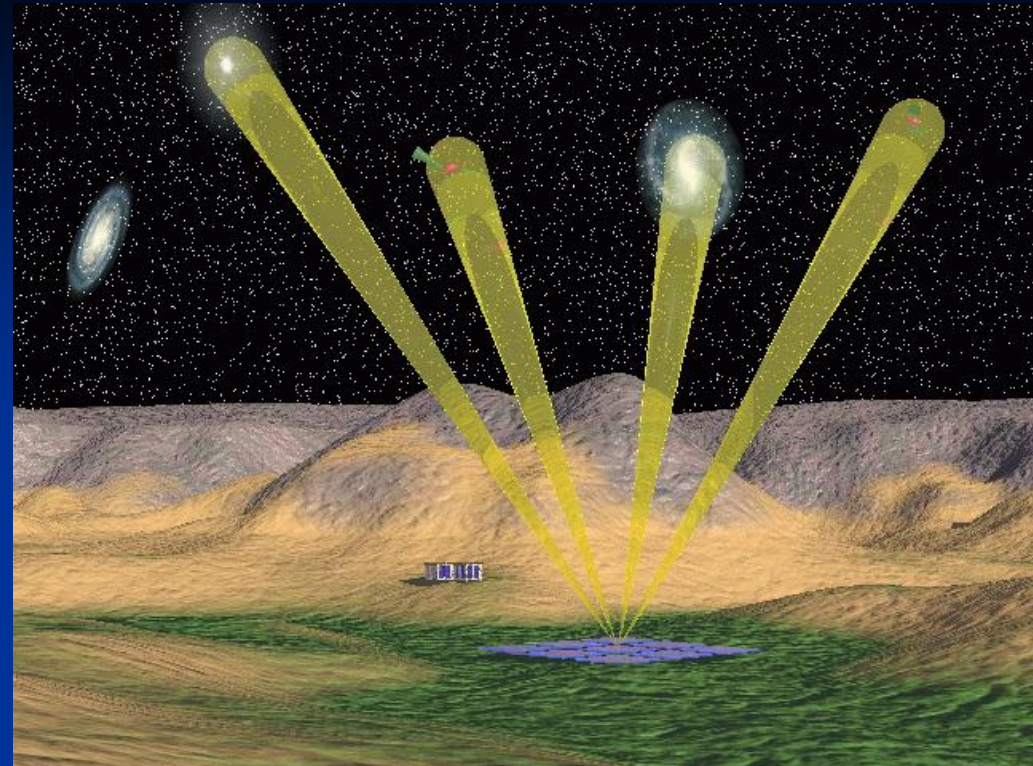
PSR 1937+21

Période: 1.56ms

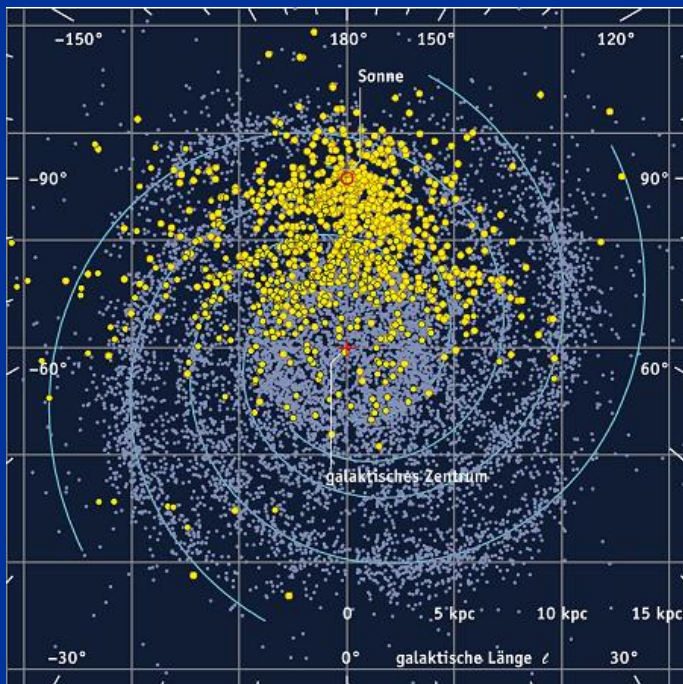
640 révolutions / s



# Observer les pulsars avec le futur SKA (Square Kilometer Array)



Source: [www.skatelescope.org](http://www.skatelescope.org)



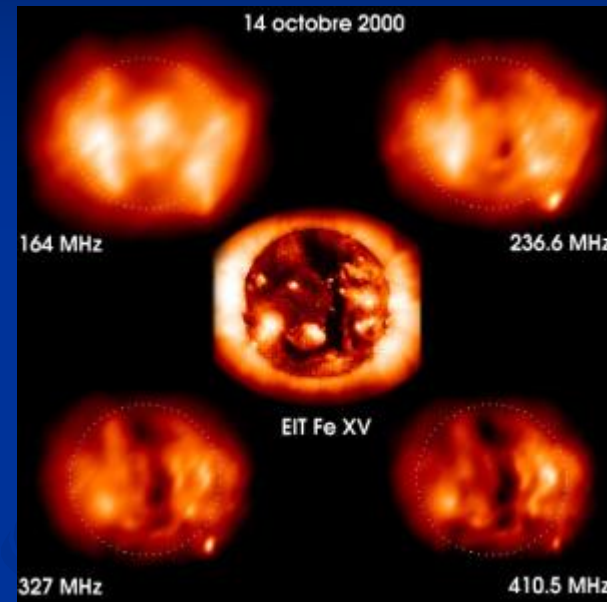
Source: [www.skatelescope.org](http://www.skatelescope.org)

## Hypothèse de distribution des pulsars galactiques détectables par SKA

# Observer le Soleil en radio

Le Soleil est un puissant émetteur d'ondes radio (découvert par les radaristes)

Couronne solaire: plasma très chaud ( $\sim 1\text{MK}$ ), présence de champs magnétiques intenses ancrés à l'intérieur du Soleil  $\rightarrow$  oscillations de plasma, effet synchrotron, émission à large bande (de  $\sim 10\text{ MHz}$  à  $\sim 10\text{ GHz}$ )



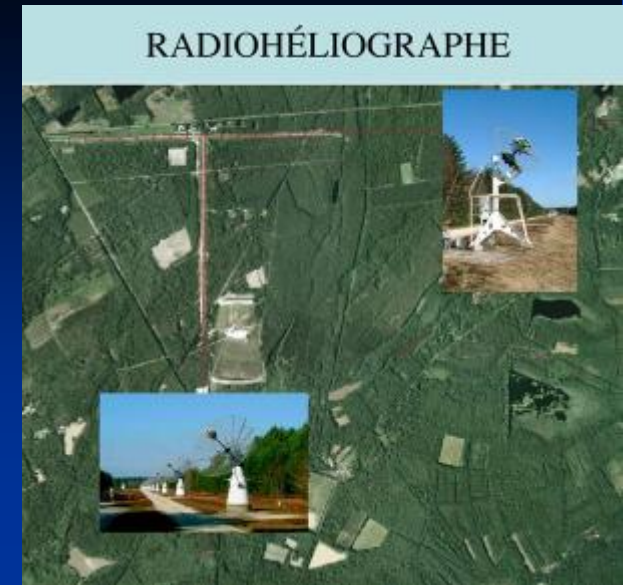
Crédit: Observatoire de Paris

Observation de la couronne solaire en radio (au centre, observation complémentaire en UV)



# Le radiohéliographe de Nançay

- Interféromètre constitué de deux réseaux d'antennes perpendiculaires; grâce à sa taille il fournit des images radio précises du Soleil
  - premier réseau, orienté est-ouest: 16 antennes de 3 m de diamètre + deux antennes de 10 m, alignées sur 3200 m.
  - second réseau, orienté nord-sud: 24 antennes de 5 m de diamètre sur une base de 1250 m de longueur
- réalise des images instantanées (1/200ème de seconde) des émissions de la couronne solaire entre 2 et 0,7 mètres de longueur d'onde
- seul instrument au monde à fournir ce type d'observations

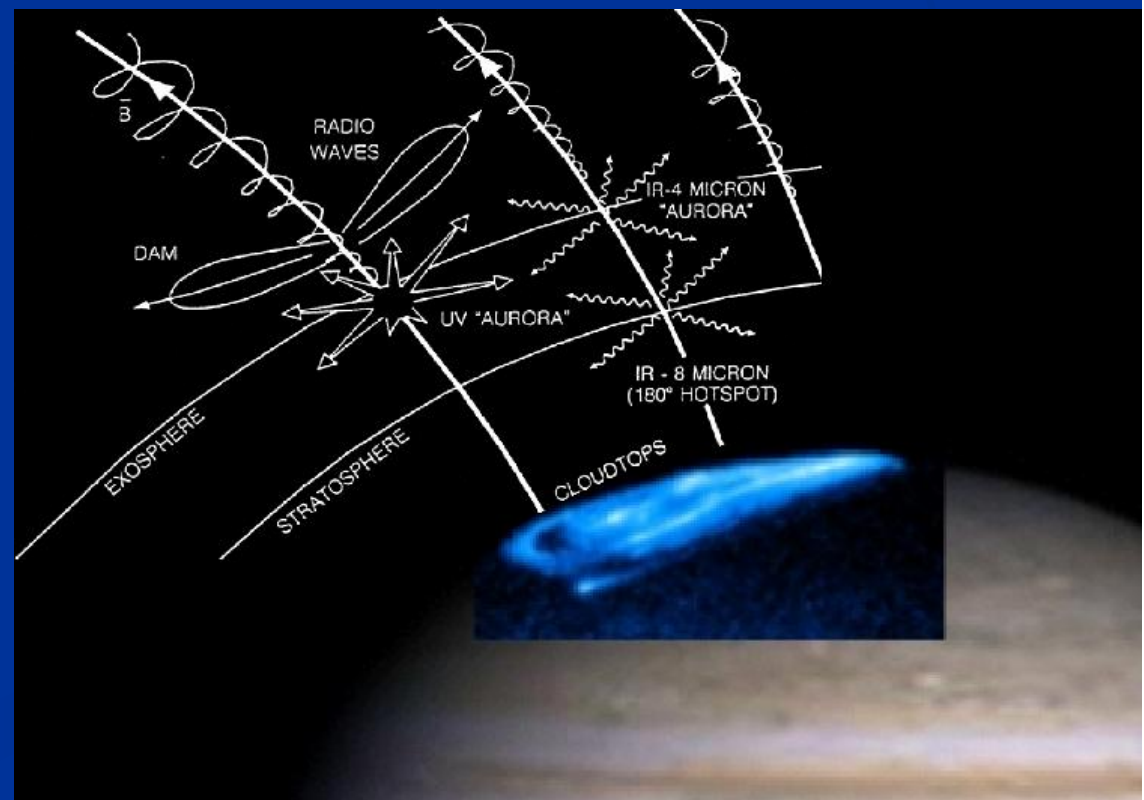


# Jupiter radiosource décamétrique

- Emission synchrotron entre 10 et 40 MHz liée au puissant champ magnétique jovien, polarisation circulaire
- Interactions complexes avec le satellite Io et avec le vent solaire (déforme la magnétosphère jovienne)

Instabilités: « orages »,  
« bursts » millisecondes

Association avec  
« aurores » UV et IR



# Le réseau décamétrique de Nançay

dédié à l'étude des environnements magnétisés et ionisés des planètes (principalement Jupiter), du Soleil et des étoiles

- composé de 144 antennes hélicoïdales coniques de 9 mètres de hauteur et de 5 mètres de diamètre à la base, réparties sur une surface de 1 ha
- fonctionne entre 3 et 30 mètres de longueur d'onde (10 à 100 MHz)
- mesure les polarisations circulaires droite et gauche du rayonnement

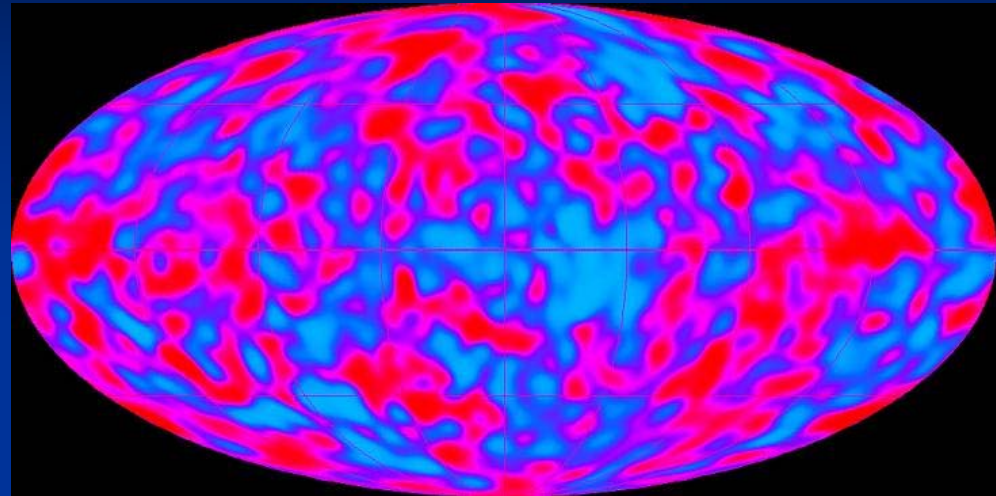
Crédits: Observatoire de Paris



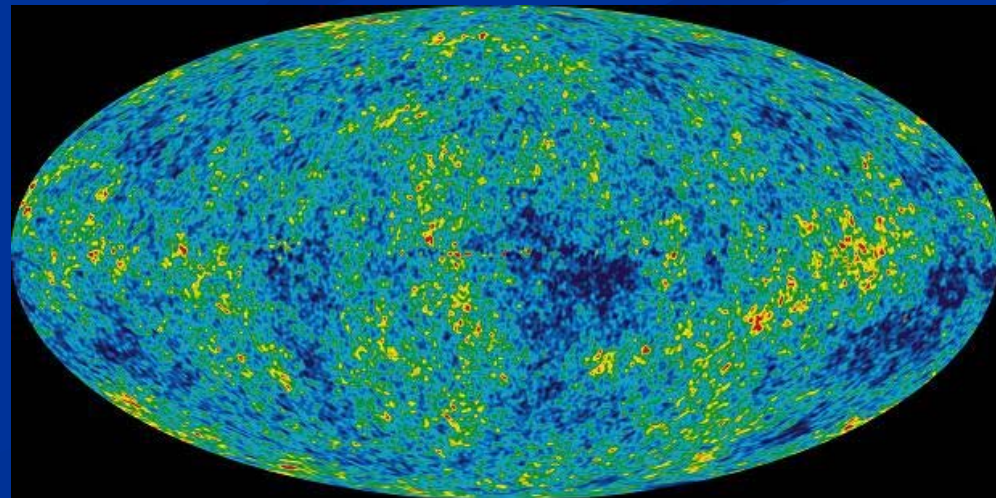


# rayonnement de fond cosmologique à 2,7°K

- Prédit par Alpher et Gamow (~1950) et découvert en 1965 par Penzias et Wilson
- "image" de l'Univers primordial 380000 ans après le "Big Bang": montre les germes des grandes structures de l'Univers actuellement observables
- Observatoires spatiaux COBE puis WMAP et PLANCK (depuis 2009), ce dernier donnant une « carte ultime » du rayonnement



Source: COBE DMR images



Source: gsfc NASA

# Observatoire Planck (ESA)

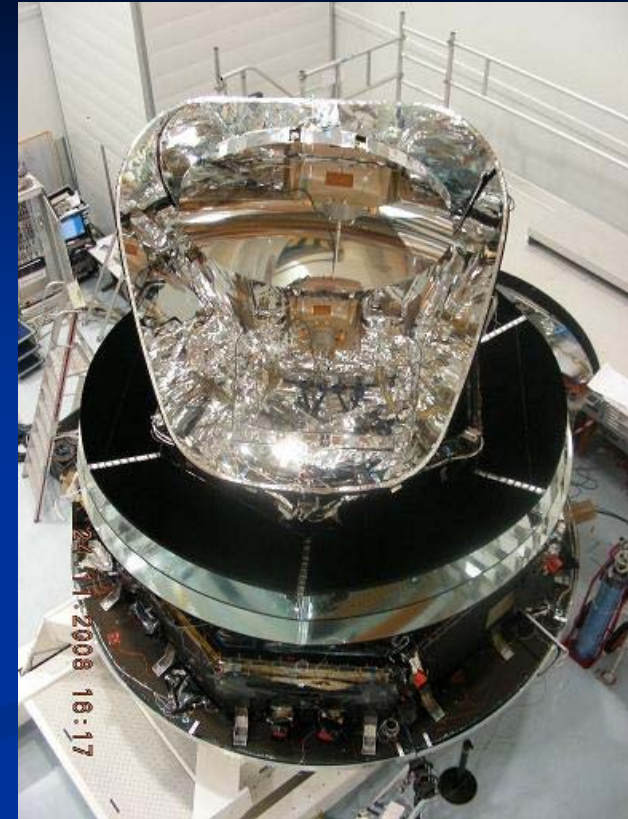
Lancé en Mai 2009, il fournit des cartes des anisotropies de température et de polarisation du CMB entre 30 et 857 GHz

Positionné au point de Lagrange L2

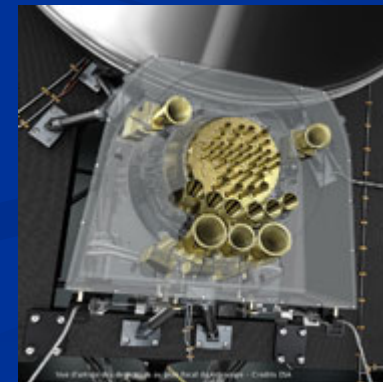
Durée de vie: 2 ans (réserve de gaz pour système cryogénique)

Plan focal: cornets multibandes

Instrument de très haute précision: résolution angulaire inférieure à 5 minutes d'arc, sensibilité en température de quelques microkelvins sur l'ensemble du ciel

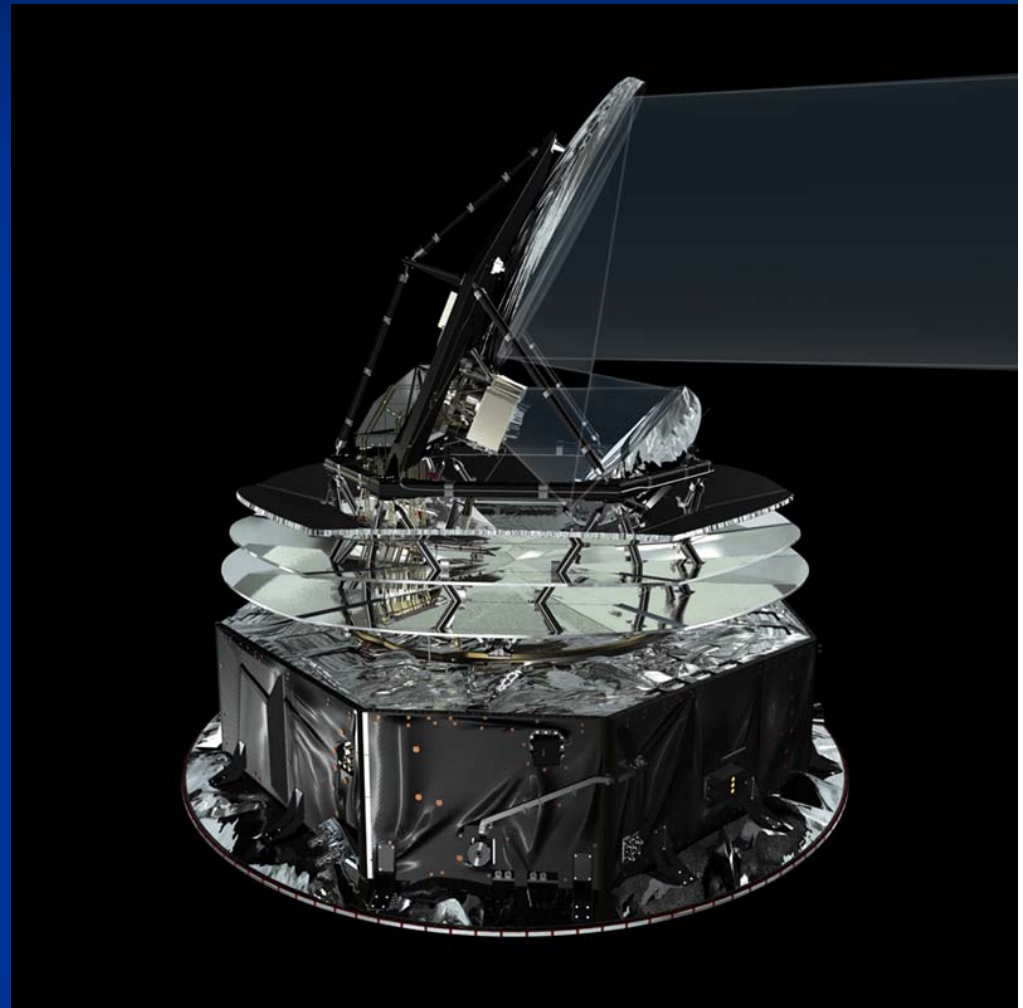


Source: smsc CNES



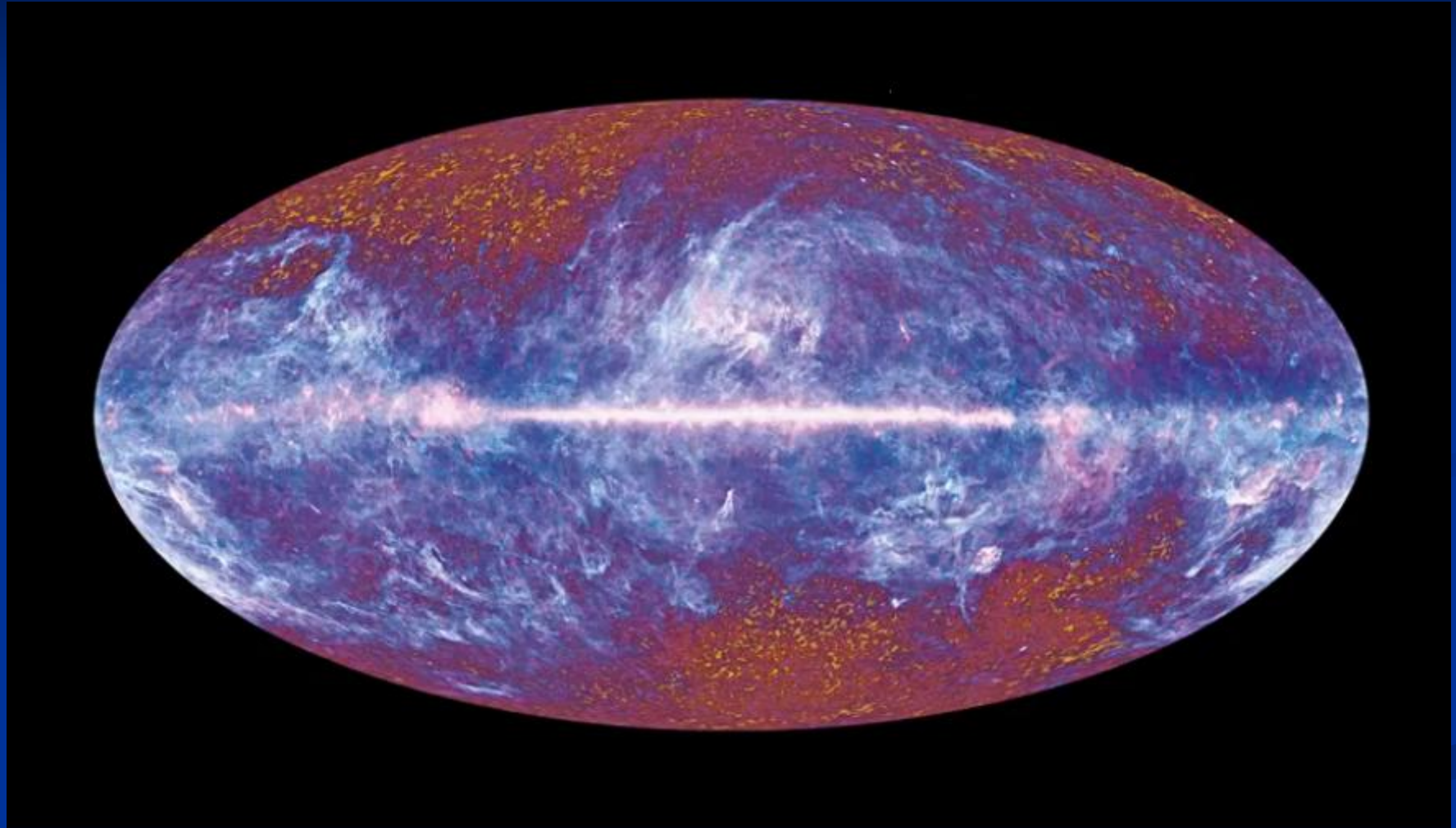
# Planck: optique et technologie

- Télescope grégorien offset « aplanatic » miroir 1,3m
- Instrument LFI: 30-100 GHz, détecteurs conventionnels HEMT refroidis à 20K
- Instrument HFI: 100-857 GHz, détecteurs bolomètres refroidis à 0,1K
- Système cryogénique à 4 étages, le dernier (0,1K) à dilution (mélange de  $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$ ) -> limite la durée de vie





# Planck: premier relevé complet du ciel



Janvier 2011 - réalisé sur 1 an avec l'instrument HFI



# Contraintes et limites de l'observation radioastronomique

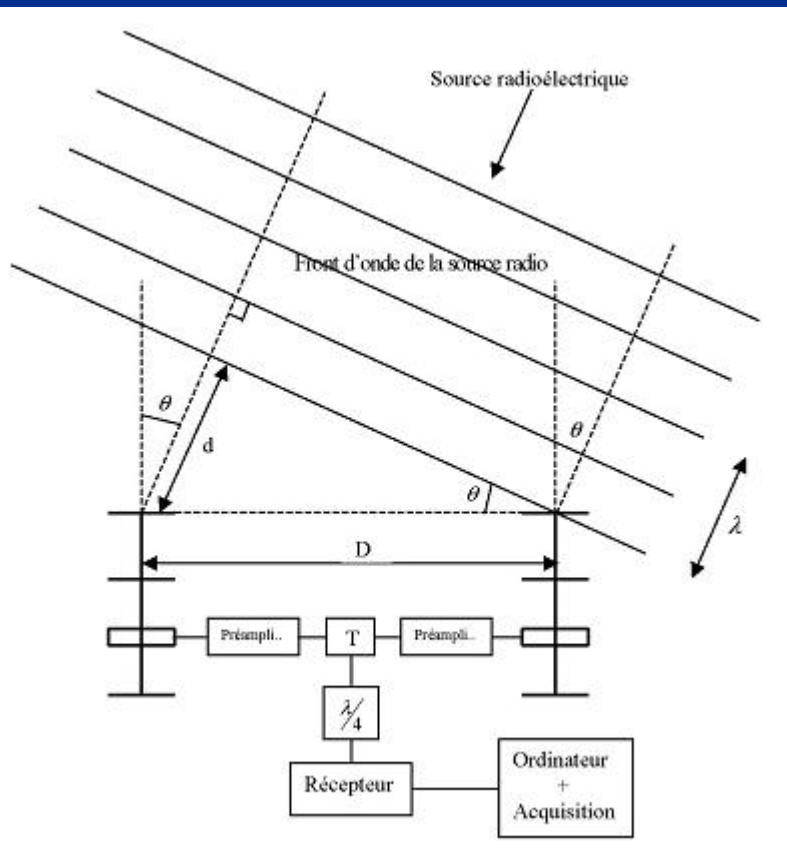
- les signaux provenant des sources radio célestes sont **très faibles**: il faut de **grandes surfaces collectrices** pour collecter suffisamment d'énergie, et des **récepteurs à faible bruit** (refroidis ou non)  
unité de flux de puissance : 1 Jansky =  $10^{-26} \text{ W.M}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$
- la taille des instruments conditionne leur "pouvoir séparateur": il faut de **grands instruments** pour observer des **détails fins** des objets du ciel
- la **pollution radioélectrique** d'origine humaine limite l'usage des bandes du spectre observables -> **bandes réservées** à la radioastronomie (ITU-R), besoin de moyens efficaces de **lutte contre les interférences**

# Antennes uniques, réseaux d'antennes et interférométrie

- Antenne unique: pouvoir séparateur  $\sim \lambda/D$  (tache de diffraction)
  - ex: antenne  $D=13\text{m}$  à  $\lambda=21\text{cm}$  (1420 MHz), ouverture lobe central  $0,8^\circ$  soit 1,6 fois la taille apparente de la Lune ou du Soleil
  - grande antenne (Effelsberg,  $D=100\text{m}$ ), ouverture lobe central  $0,1^\circ$  à 1420 MHz
  - pour mémoire: pouvoir séparateur de l'œil:  $1'$  soit  $1/60^\circ$ ; un télescope optique est encore bien meilleur
- Idée pour dépasser cette limite théorique: **combiner les signaux provenant de plusieurs antennes** -> synthèse d'un télescope de dimension égale à l'espacement entre les antennes

# Principe de l'interférométrie

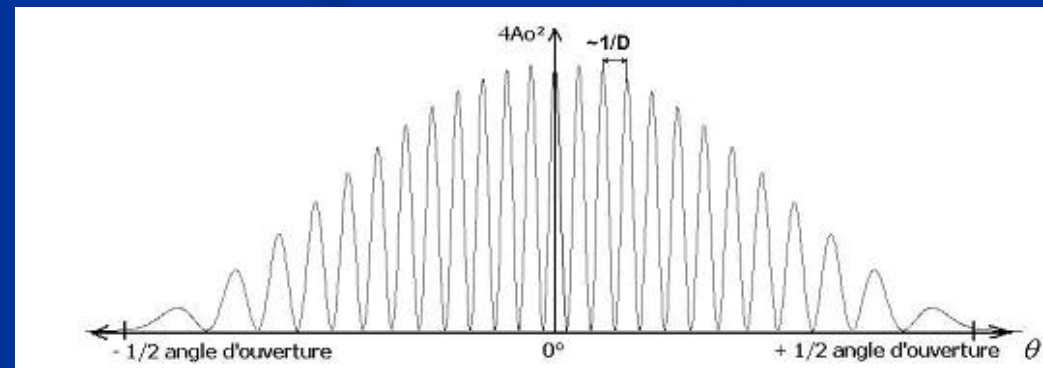
## Exemple d'interféromètre à deux antennes



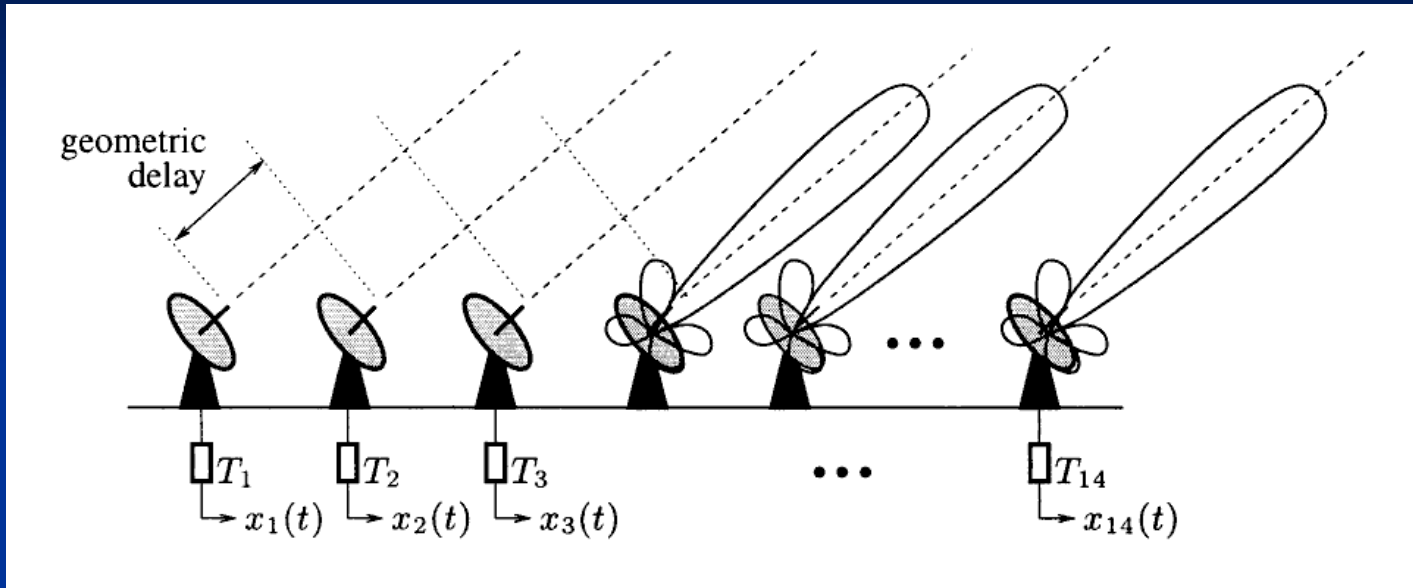
Corrélation entre les sorties des antennes

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

Enveloppe: lobe principal de chaque antenne



# Réseau phasé d'antennes



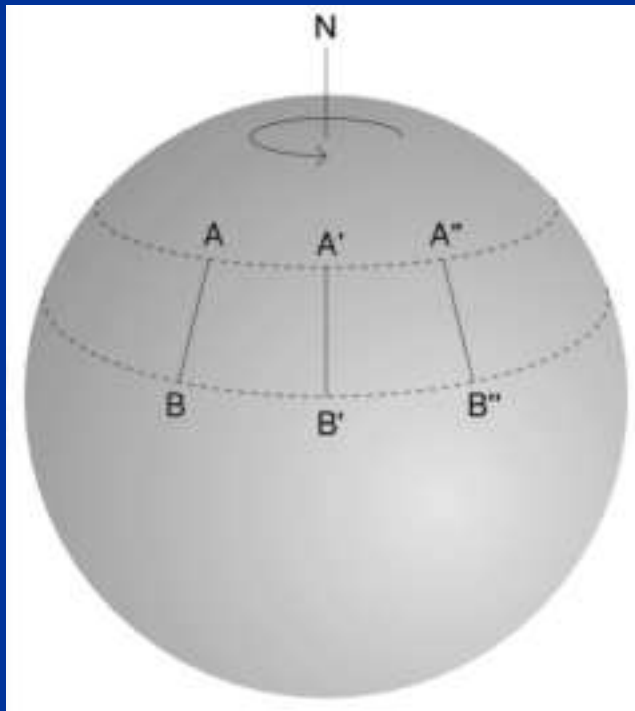
Crédit: Leshem et Coll. ApJS 2000

Les retards  $T_1 \dots T_{14}$  compensent les retards géométriques introduits par le pointage vers la source observée suivant l'angle compté à partir du zénith. La sortie du réseau est la somme des signaux  $x_1(t) \dots x_{14}(t)$ .

En remplaçant les retards purs par des filtrages réglables, on dispose de nombreux degrés de liberté pour optimiser le diagramme de rayonnement du réseau.

# Interférométrie à synthèse d'ouverture

idée (Ryle et Hewish): utiliser la rotation de la Terre pour multiplier les lignes de base et donc les « points de vue » sur la source



Les données captées par les antennes aux points A et B, puis A' et B', etc sont combinées pour obtenir des « images » avec la résolution d'un instrument s'étendant sur tout l'espace balayé par les antennes

Source: Wikipédia



# Exemples d'interféromètres



Very Large Array (VLA), USA (NRAO)

27 antennes de 25m, branches de  
21km et 19km – extension max 36km

Résolution: 0,04'' arc à 40 GHz



Atacama Large Millimeter Array  
(ALMA), Chili (ESO)

50 à 64 antennes mobiles de 12m

Observations entre 10mm et 0,3mm

# LOFAR: grand réseau européen « basses fréquences » (30 à 240 MHz)

50 réseaux phasés en Europe (40 aux Pays-Bas), dont un à la station de radioastronomie de Nançay (1 600 antennes et leurs 96 récepteurs associés) inauguré en Mai 2011



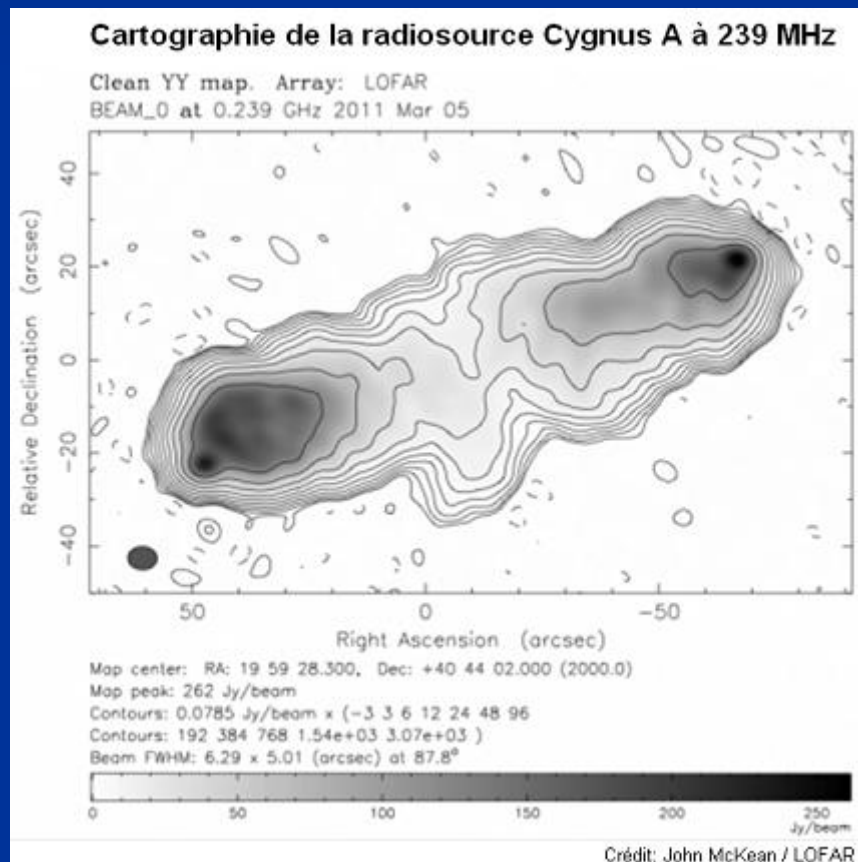
Réseau de Nançay

Implantation des réseaux



# LOFAR: Low Frequency Array

but: former des images du ciel radio basses fréquences, beaucoup plus sensibles et précises que ce qui existe, dans un grand champ de vue instantané



recherches sur la formation des premières étoiles et des premiers trous noirs de l'Univers, les galaxies, les amas et grandes structures, le champ magnétique galactique, la cartographie profonde du ciel radio, la détection des rayons cosmiques et des milliers de sources transitoires ou sporadiques (pulsars, explosions d'étoiles, trous noirs, planètes ... et peut-être exoplanètes), ou l'étude du Soleil.

# La radioastronomie d'amateur?

La radioastronomie, discipline a priori « austère » et technique, est moins séduisante que l'astronomie optique

Elle ne produit pas directement de belles images mais des signaux qu'il faut traiter au moyen d'algorithmes mathématiques pour « voir » des résultats d'observations

Elle nécessite des moyens lourds (grandes antennes, matériel électronique élaboré, ordinateurs...) pour être performante

Les chiffres: environ 50 000 astronomes amateurs en France, mais moins de 300 radioastronomes amateurs (très souvent radio-amateurs)

# Oui car...

La pratique de la radioastronomie est très formatrice et permet l'accès à de nombreux phénomènes physiques régnant dans l'Univers

Des résultats intéressants peuvent être obtenus avec du matériel simple

C'est une astronomie « tous temps » faisant fi de la météo

C'est un « travail » d'équipe passionnant: il existe en France et à l'étranger (USA, UK, Allemagne...) des associations actives de radioastronomes amateurs souvent conseillées ou soutenues par des institutions (Universités, NASA, CNES...)

# Des exemples

Ce que l'on peut assez facilement capter :

- émissions du Soleil sur 20/30 MHz, 140/150/160 MHz, 430/650 MHz, 2.3/10/12 GHz, transits solaires
- sursauts RF de Jupiter sur 20/21 MHz
- échos météoriques (technique du radar bistatique) notamment sur 50 MHz

Bandes ITU	Types d'observation
13,36 MHz à 13,41 MHz	Soleil, Jupiter
25,55 MHz à 25,67 MHz	Soleil, Jupiter
37,5 MHz à 38,25 MHz	Jupiter
73 MHz à 74,6 MHz	Soleil
150,05 MHz à 153 MHz	Continuum, pulsar, Soleil
322 MHz à 328,6 MHz	Continuum, deutérium
406,1 MHz à 410 MHz	Continuum
608 MHz à 614 MHz	VLBI
1 330 MHz à 1 400 MHz	Raie HI red-shiftée
1 400 MHz à 1 427 MHz	Raie HI

bandes accessibles basses



# D'autres exemples

Ce que l'on peut aussi faire d'amusant:

- participer à la recherche SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) en veillant les signaux autour de 1420 MHz
- communiquer par réflexions sur la Lune (EME)



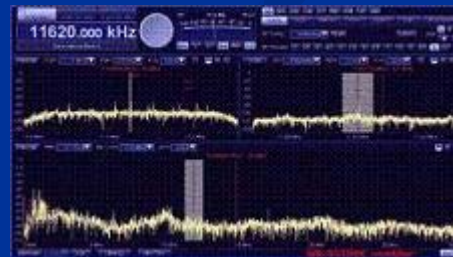
Crédit F5KKJ  
"Blagnac Amateur Radio"

# Le matériel nécessaire

antennes dipôles et Yagi  
(météores, Jupiter, Soleil, Voie Lactée)  
paraboles TV de 80 cm (Soleil)  
paraboles de 3 à 5 mètres (SETI)



récepteurs radio du commerce à large bande (quelques dizaines de kHz à quelques GHz), très sensibles et pouvant décoder les modulations courantes (CW, SSB, AM, FM), radio logicielle (le futur...)



récepteurs dédiés à certain types d'observations, du commerce (Haystack, pour la réception du rayonnement HI) ou réalisés par des radioastronomes amateurs

# 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 ayant généralement des compétences scientifiques et techniques élevées: ingénieurs, techniciens, enseignants, astronomes amateurs...
- Elle s'appuie sur un conseil scientifique de 5 membres académiques
- ses objectifs: pédagogie pour l'Université, les écoles, le grand public et les clubs d'amateurs; observations institutionnelles de satellites; contribution à la recherche

# Le radiotélescope PB8 de Pleumeur-Bodou

Projet conduit par l'association  
Observation radio – Pleumeur Bodou:  
convertir une antenne de  
télécommunications de 13m (PB8) en  
radiotélescope décimétrique

Programmes d'observation:  
rayonnement galactique, pulsars, etc

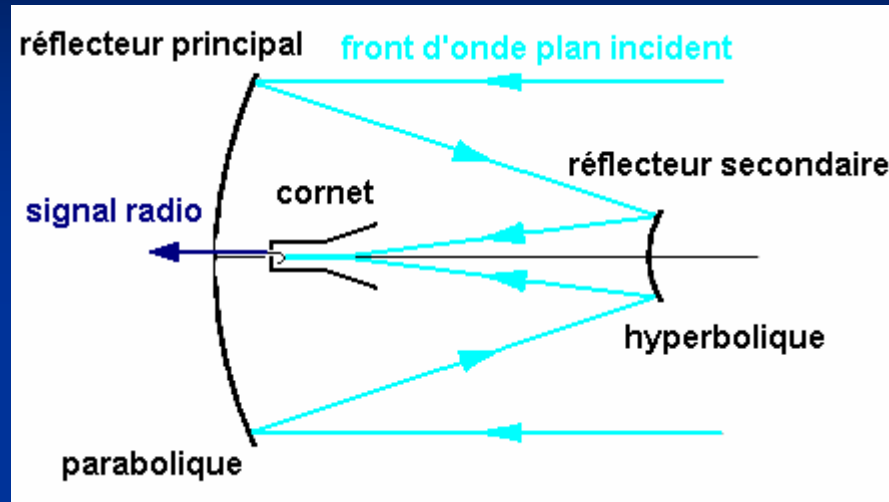
Programme instrumental: lutte contre  
les interférences électromagnétiques



L'antenne PB8 de 13m  
et l'antenne équatoriale de 3m



# Optique de l'antenne de 13m PB8

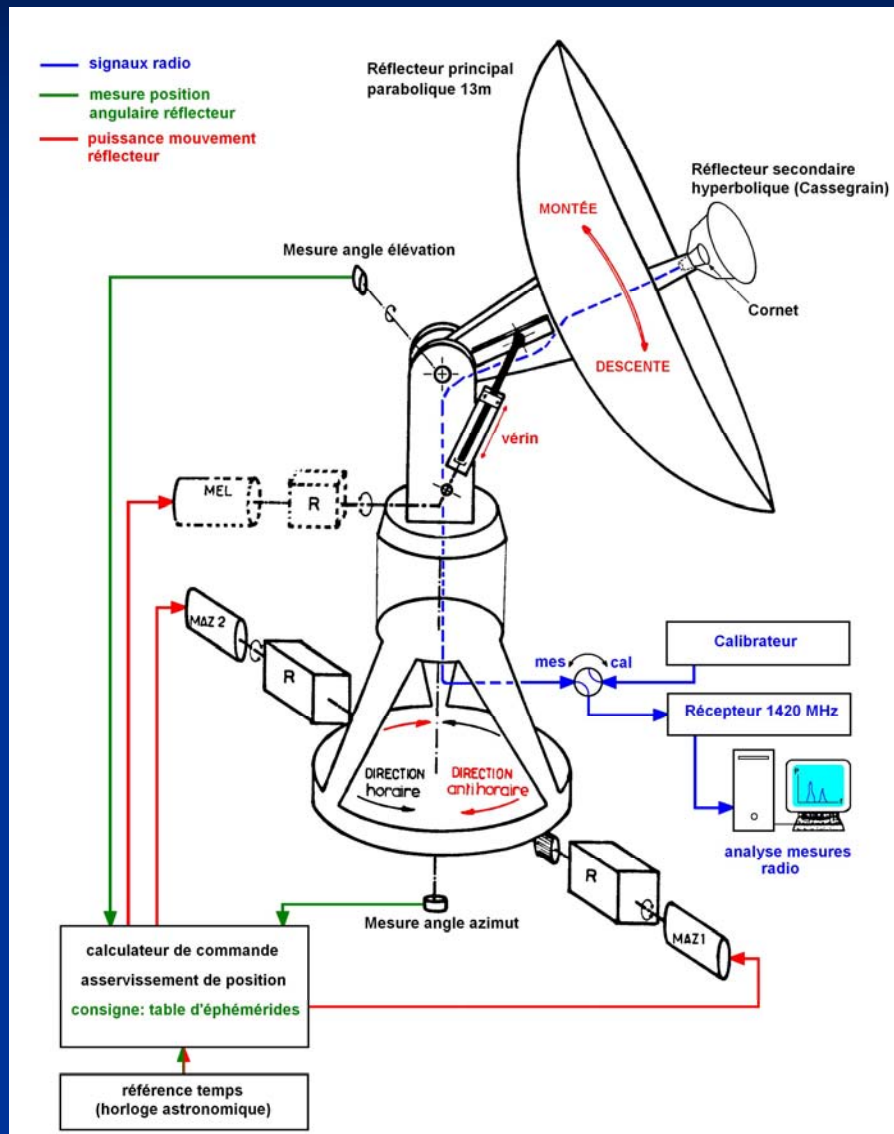


## Optique Cassegrain

réflecteur secondaire  
hyperbolique et cornet  
collectant les ondes radio



# Organes du radiotélescope



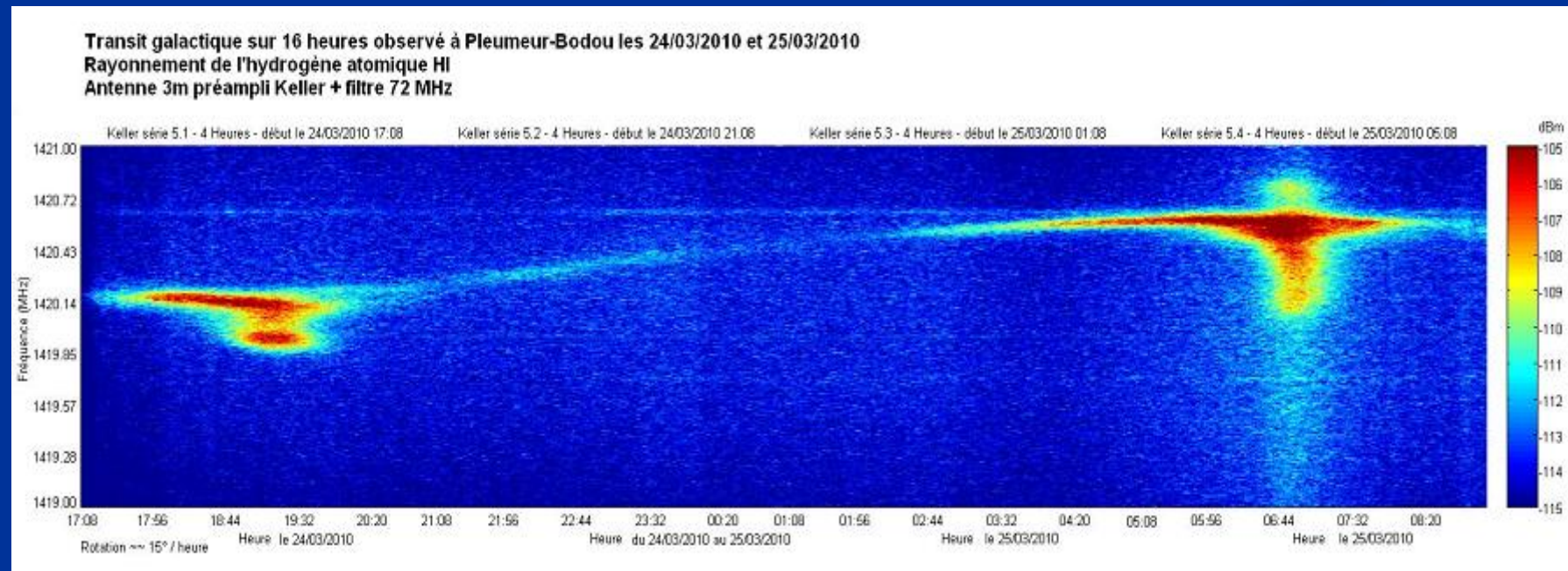
mouvement alt-azimutal  
piloté par ordinateur

récepteur:  
LNA+spectrographe

deux polarisations  
observables

# Premier résultat en radioastronomie

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

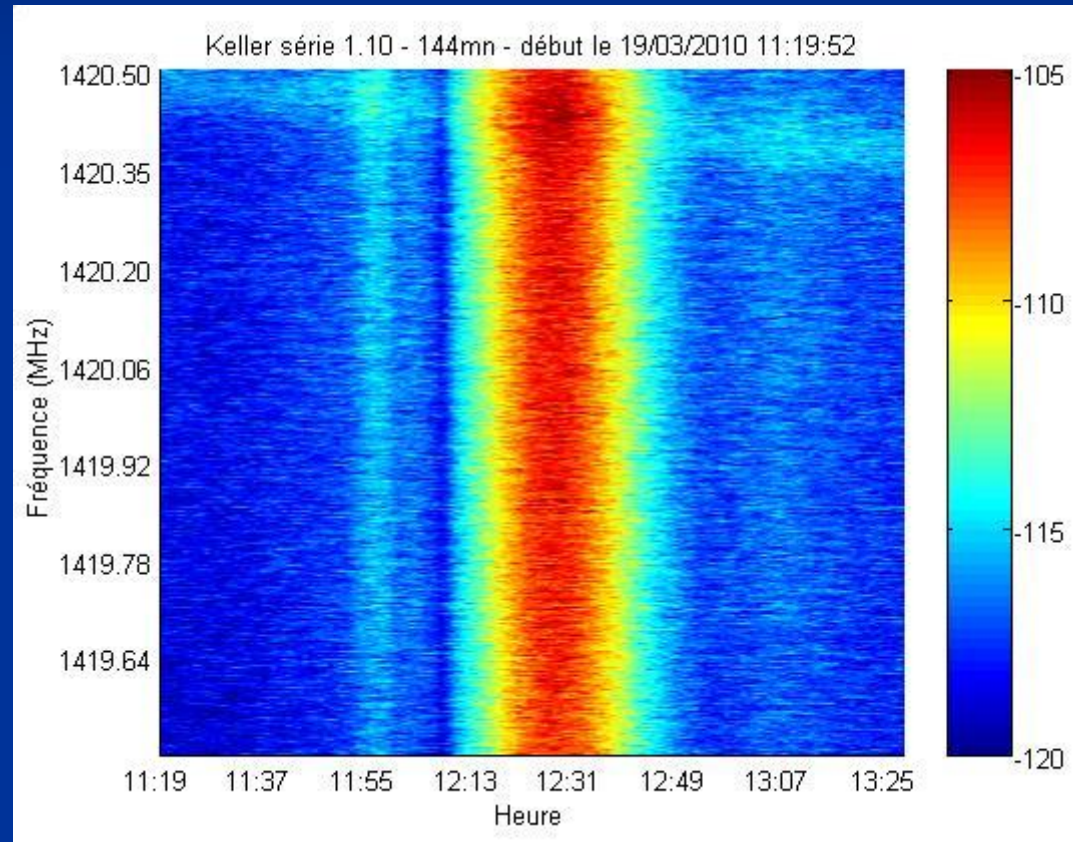


# Autre résultat: transit solaire autour de 1420 MHz

obtenu avec l'antenne équatoriale de 3m et la source hélicoïdale

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  $4^\circ$ : le Soleil est vu comme un « point lumineux » donc la fonction d'instrument est visible (lobe central et lobes secondaires latéraux)

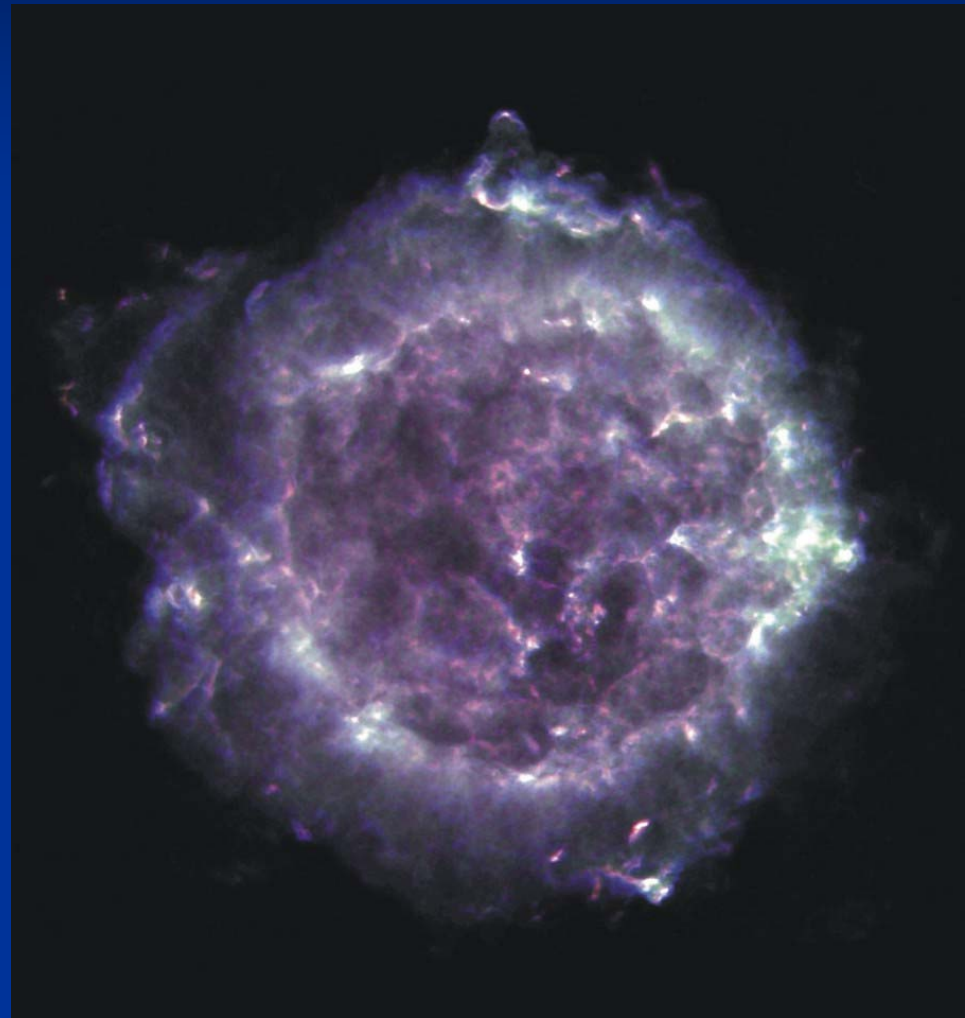




# Images radio d'objets célestes: ce que ne montre pas le visible

radiosource Cassiopée A:  
reste de supernova  
apparue il y a 300 ans, et  
située à 11000 années-  
lumière.

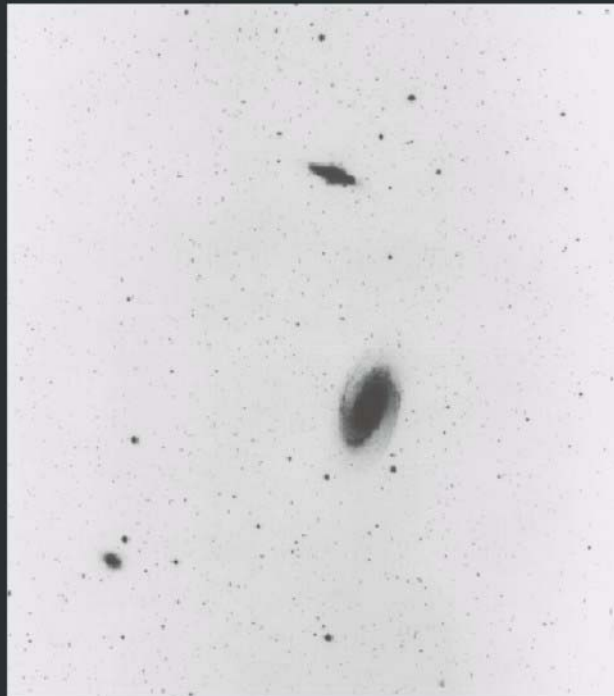
Image radio composite,  
d'après données VLA aux  
fréquences 1.4, 5.0 et 8.4  
GHz. Les éjectats  
produits lors de  
l'explosion apparaissent  
sous forme de filaments  
brillants.



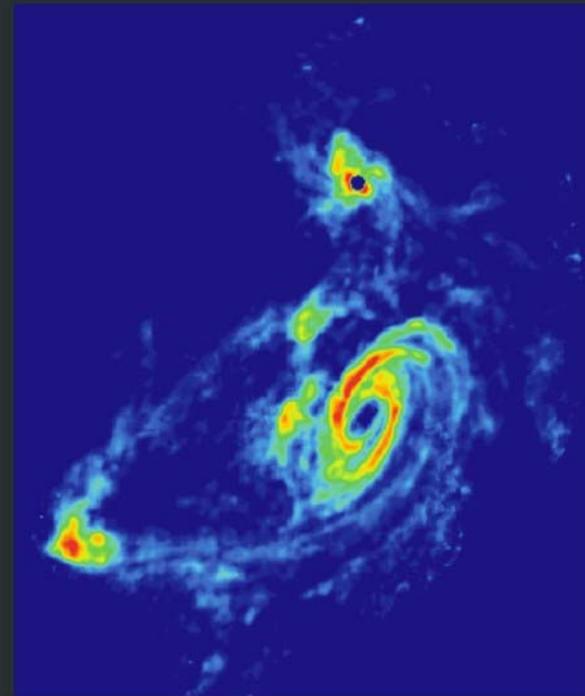
Crédit: NRAO/AUI - VLA

## TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution

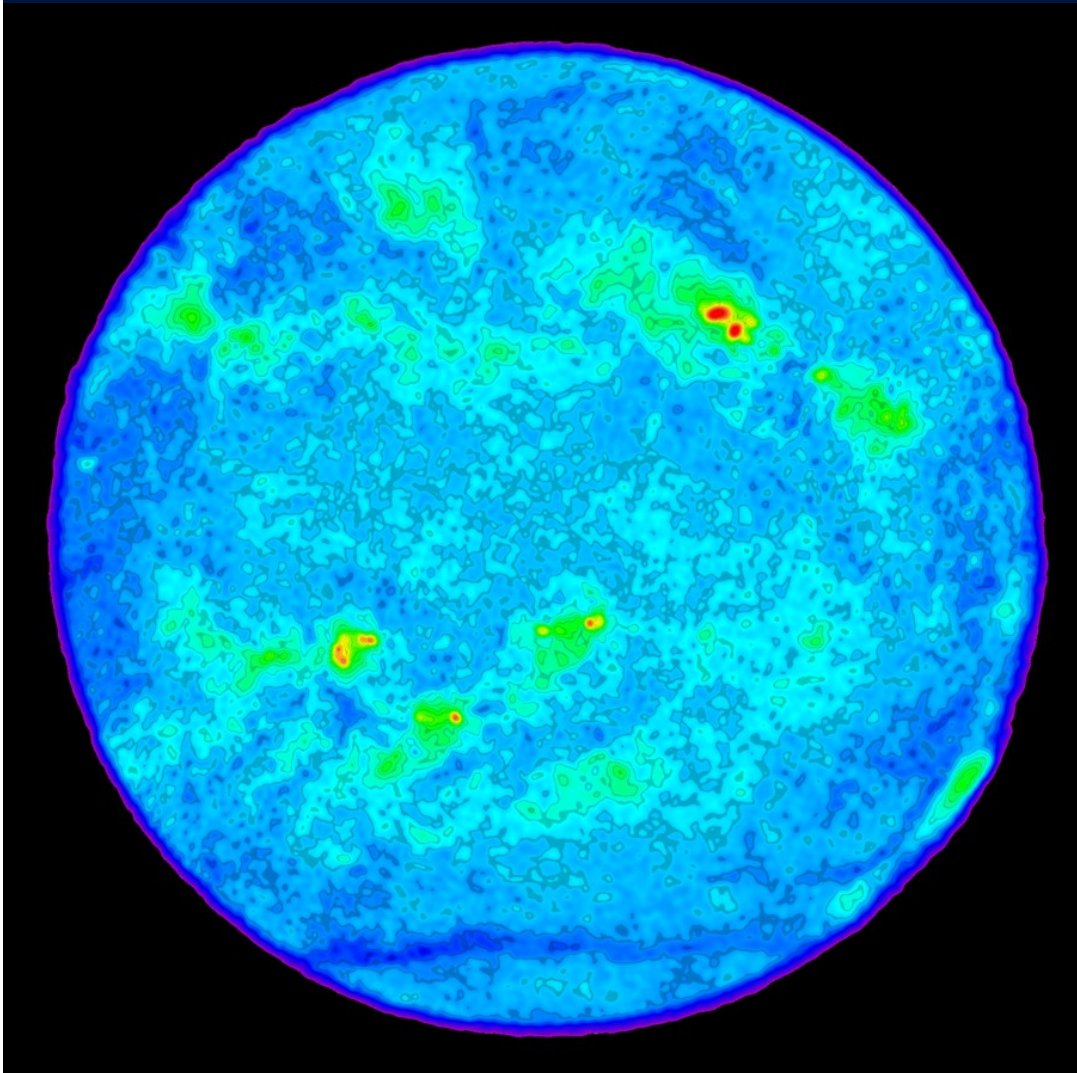


21 cm HI Distribution



Crédit: NRAO/AUI - VLA

L'image de droite, obtenue en rayonnement HI à 21cm, montre des filaments de gaz connectant les galaxies du groupe; cette interaction entre les galaxies est indétectable en lumière visible.



Crédit: NRAO/AUI - VLA

Disque solaire à 4.6 GHz.

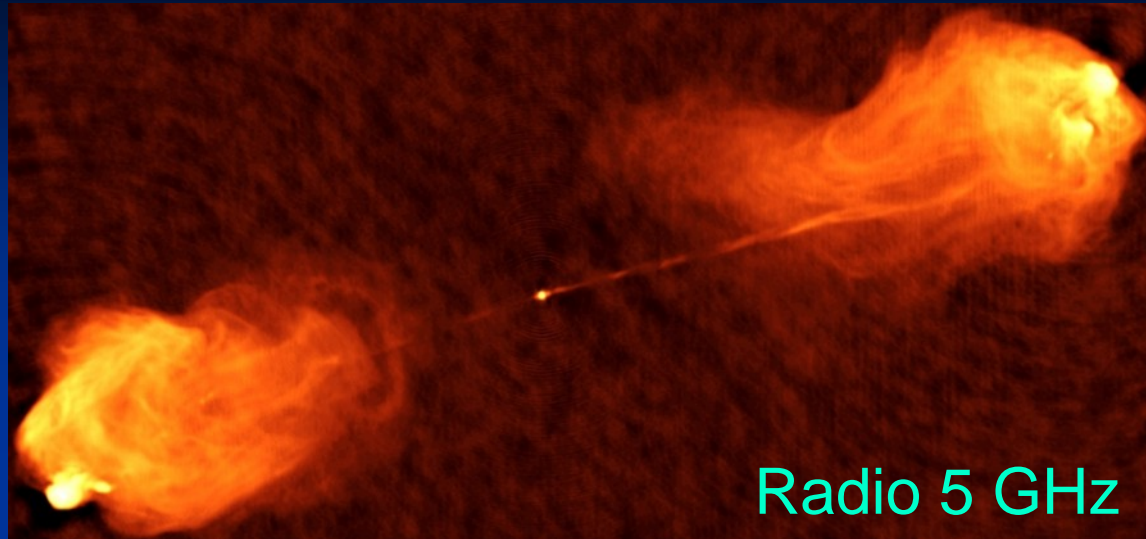
Résolution de l'image: 12 secondes d'arc, soit environ 8400 km à la surface du Soleil.

L'image optique au même instant montre des taches solaires coïncidant avec des détails visibles en radio.

Le disque solaire est un peu plus grand en radio qu'en visible.

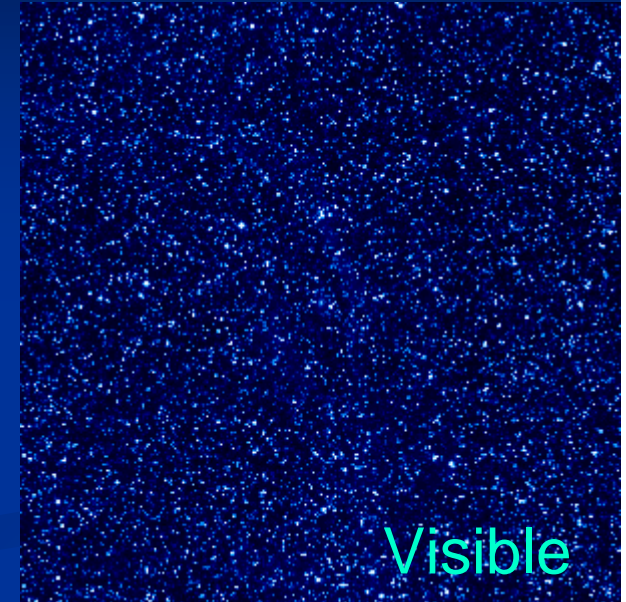


# Cygnus A



Radio 5 GHz

Crédit: NRAO/AUI - VLA



Visible

Crédit: Palomar Sky Survey

La radiosource Cygnus A se situe à 600 millions d'années-lumière; elle est nettement plus étendue que notre Galaxie. Les ondes radio proviennent d'électrons relativistes éjectés depuis le point central – probablement un trou noir – qui rayonnent par effet synchrotron dans les deux lobes. La source rayonne aussi en HI à 1420 MHz.

# Du VLA au SKA: les radiotélescopes à l'écoute de l'Univers...



PB3



PB5



PB8

<http://www.obsradio.asso.fr>

Merci pour votre attention

