

Radioastronomie amateur  
Comment cartographier notre  
Galaxie avec une clé USB TNT

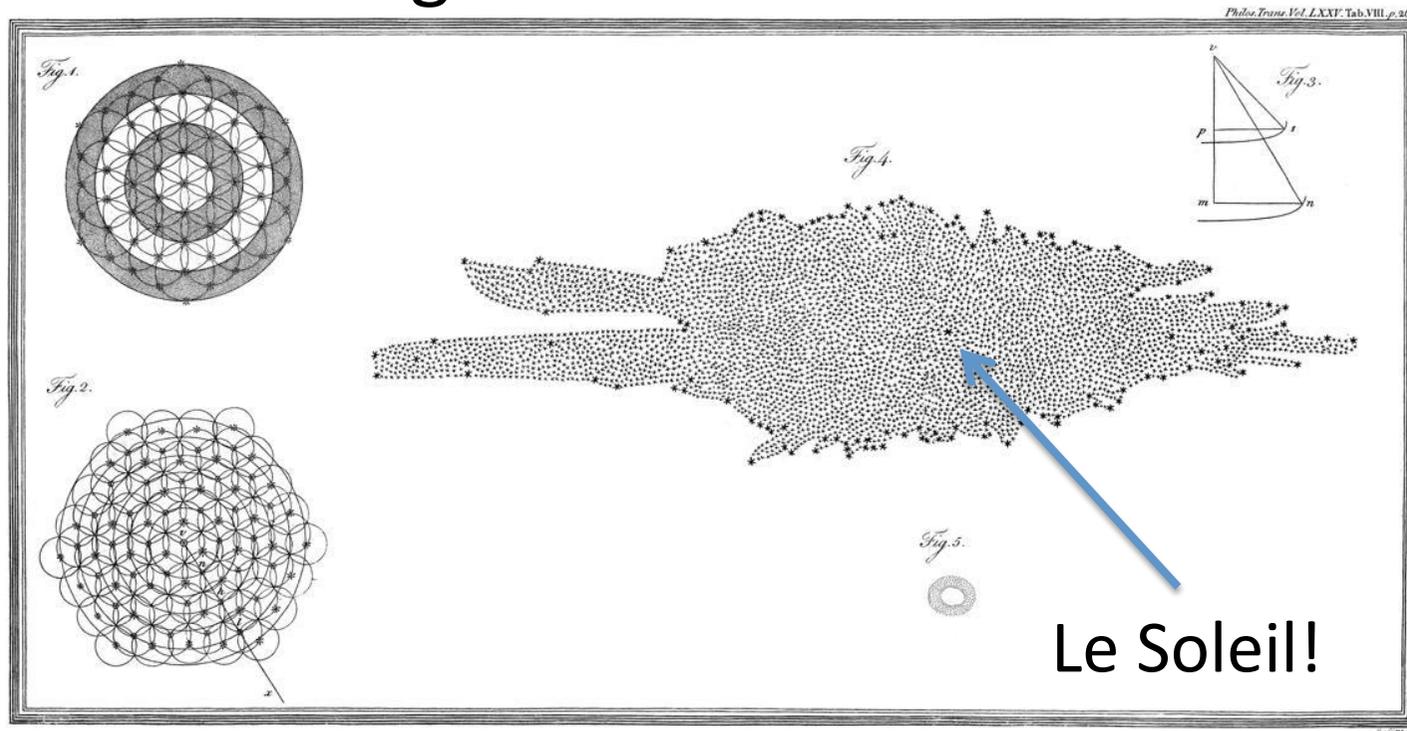
Michel Piat



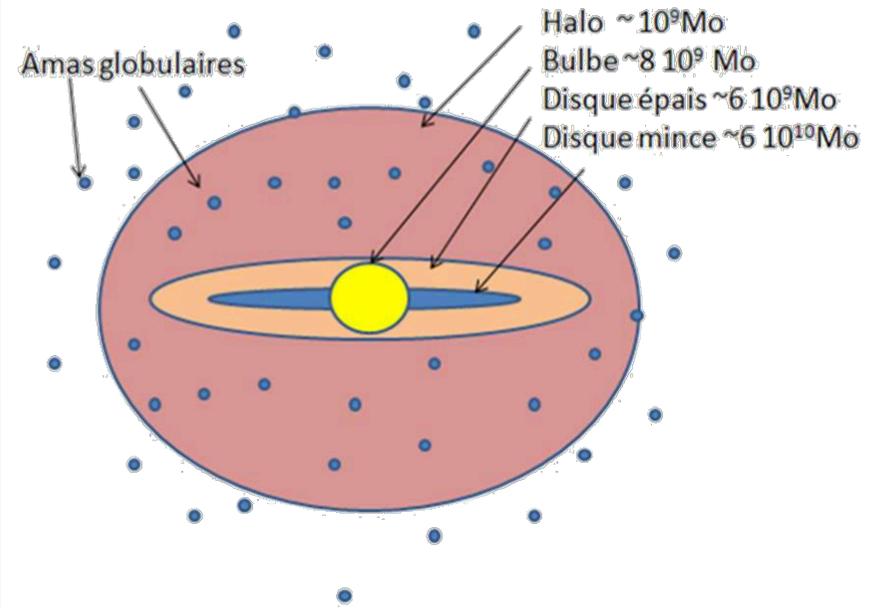
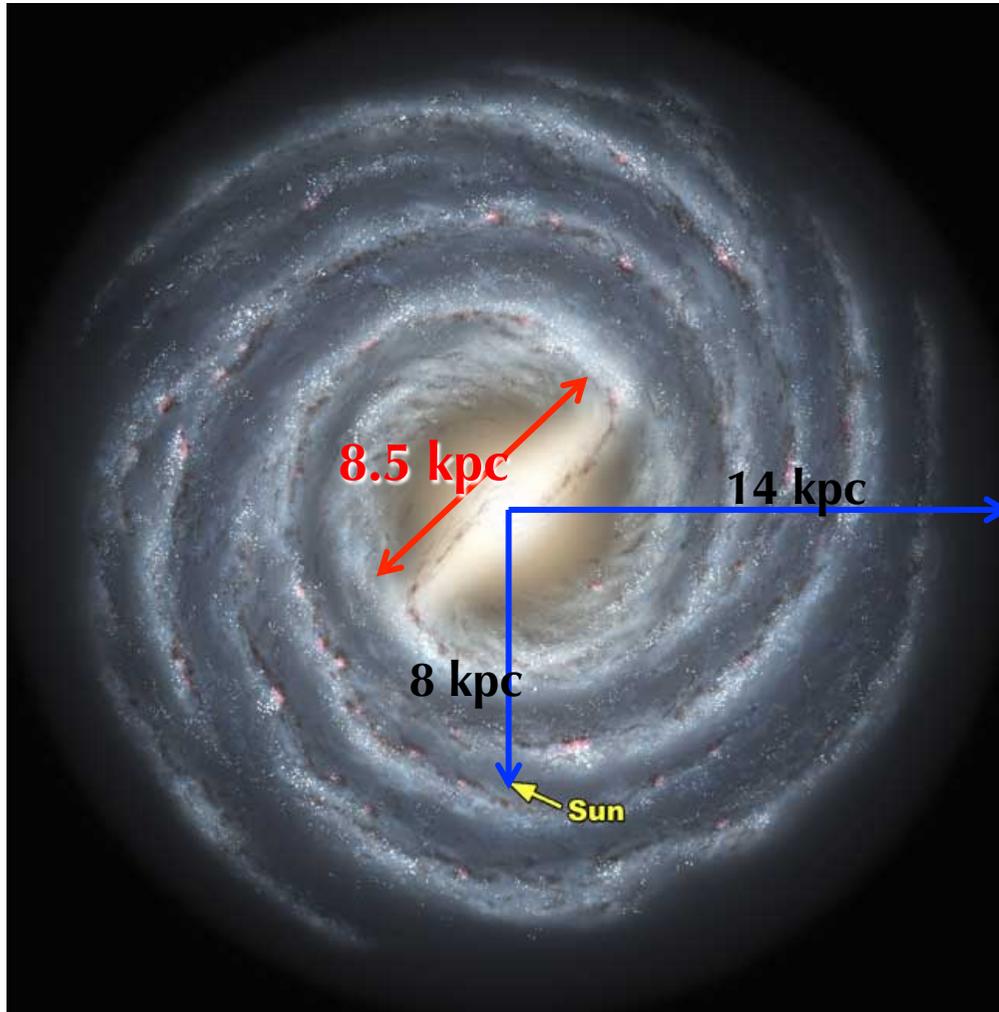


# Notre Galaxie vue par Herschel (1738-1822)

- 1785: dénombrement des étoiles dans différentes régions du ciel



# Notre Galaxie



Radioastronomie:  
rôle fondamental pour  
arriver à cette vision

# Radioastronomie amateur?



# Au menu

1. Comment est-on arrivée à la vision actuelle de notre Galaxie?
2. Utilisation de la raie à 21cm pour cartographier notre Galaxie
3. Méthode de détection radio
4. Système SDR

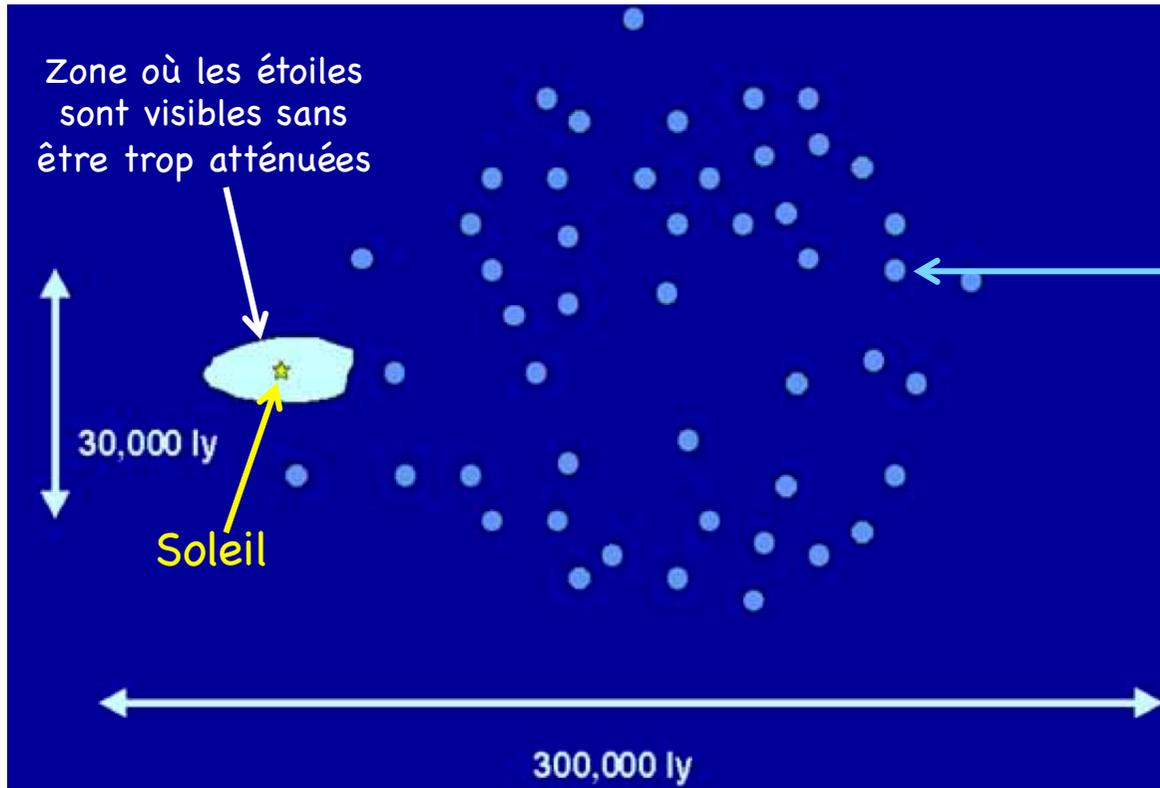
# 1. Comment est-on arrivée à la vision actuelle de notre Galaxie?

- Utilisation de télescopes **dans le domaine visible**: étoiles, amas, galaxies
  - 1845 Parsons: observation de galaxies spirales résolues en sources ponctuelles
  - 1918 Shapley: répartition amas globulaires, Soleil pas au centre
  - 1920 Hubble: Mont Wilson, étoiles dans les galaxies spirales



M51 (les Chiens de Chasse)  
vue par Parsons

# Notre Galaxie en ~1920

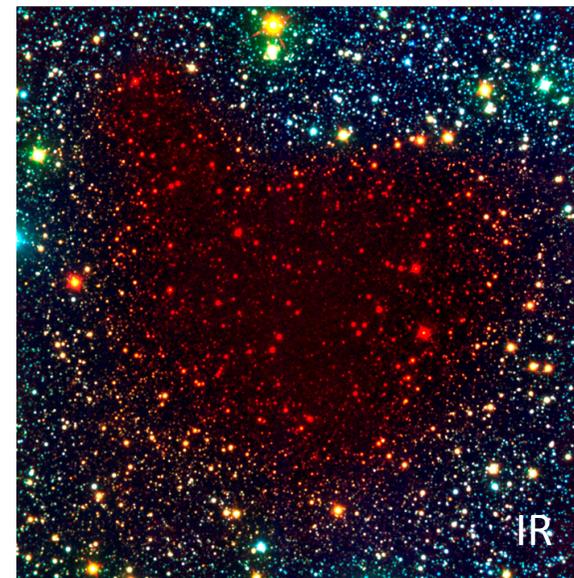
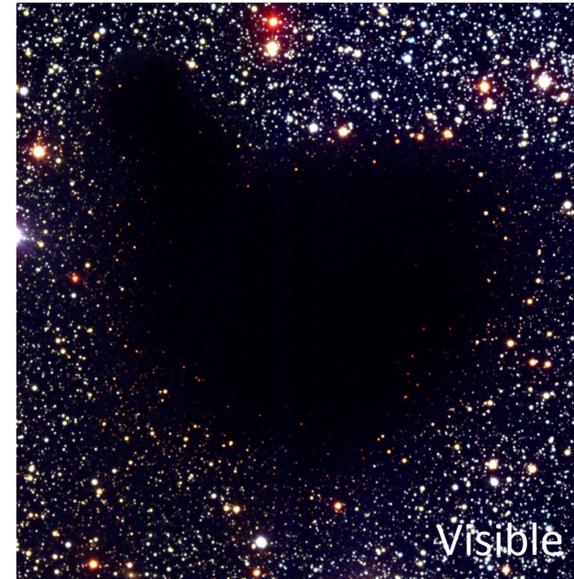


Amas globulaires

(D. Elbaz)

# Problème: la poussière...

- Absorption de la lumière visible des étoiles par les poussières du milieu interstellaire
  - Distance limitée à quelques kpc du Soleil
- Cela n'est pas le cas dans le domaine radio!



M16 ■ Eagle Nebula

Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS/IR



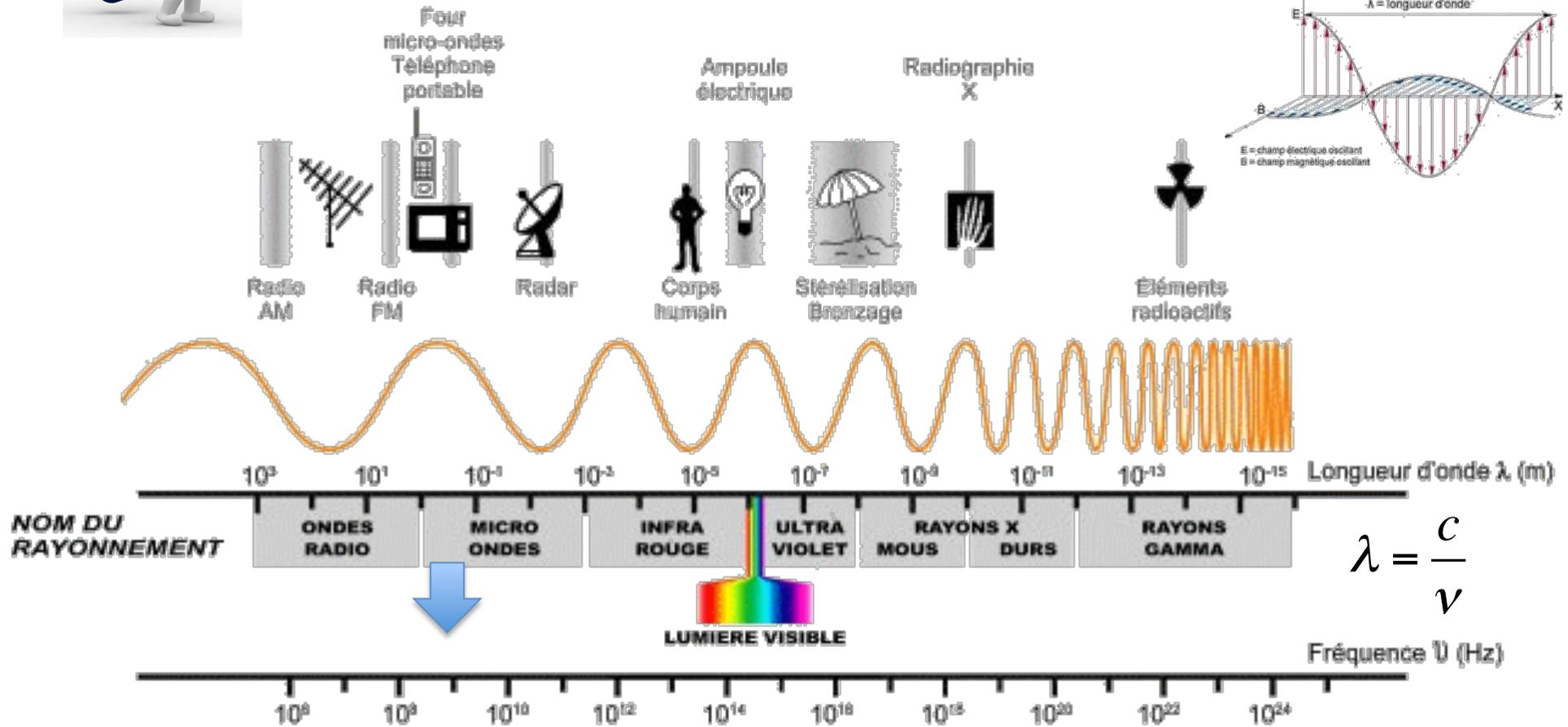
Visible



Infrared



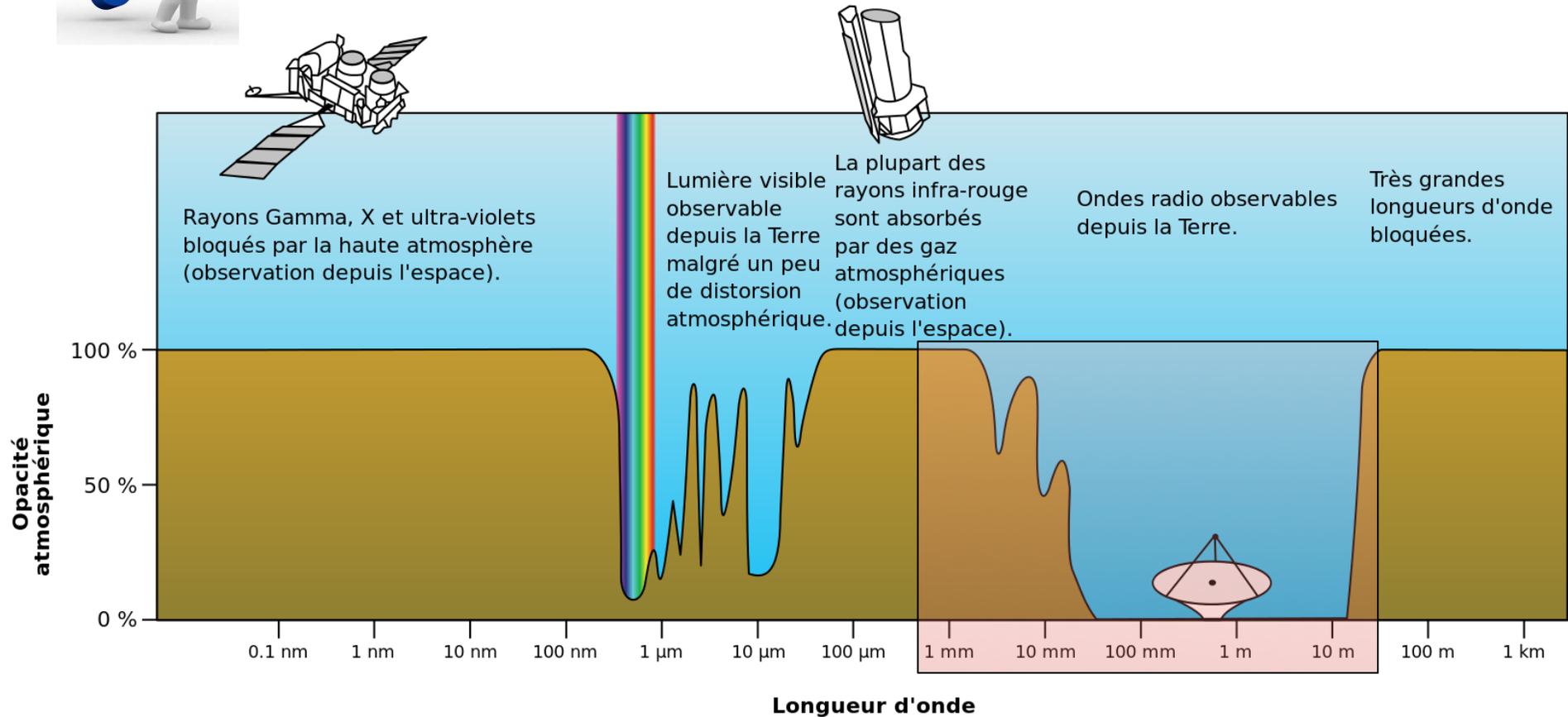
# Spectre électromagnétique



$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$



# Effet de l'atmosphère



- Radioastronomie: de  $\lambda \approx 1\text{mm}$  à  $\lambda \approx 10\text{-}15\text{m}$

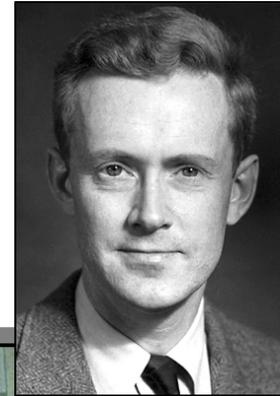
# 1944: Van de Hulst & Oort

- Jan Oort (1900-1992): astronome hollandais
  - Etude de la galaxie dans le visible
  - Nécessité d'une sonde plus profonde
- Hendrik C. Van de Hulst (1918-2000): étudiant de Oort
  - Recherche d'une raie radio...
  - **Prédiction de la raie de transition hyperfine de l'hydrogène à  $\lambda=21\text{cm}$**
  - Détection impossible?

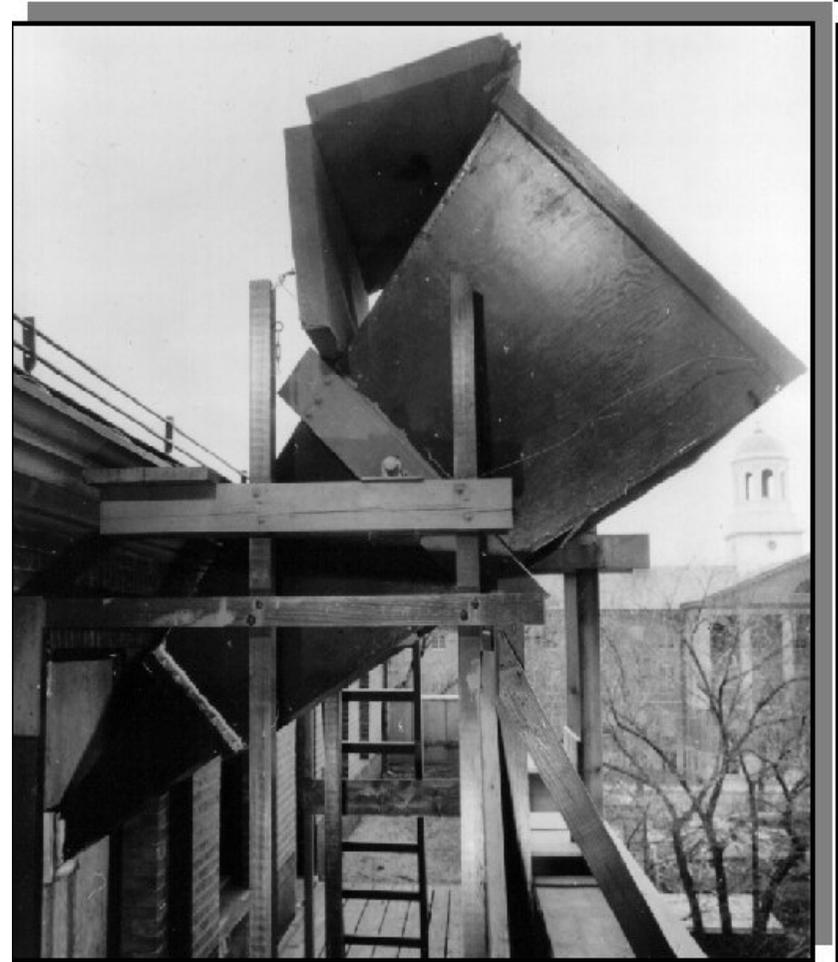


# 1951: Ewen et Purcell

- Edward M. Purcell (1912-1997): physicien américain à Harvard
- Harold I. Ewen (1922-2015):
  - Construction et mise au point cyclotron à Harvard
  - Doctorat (nuit et week-end): construction d'un détecteur radio à 21cm sous la direction de Purcell... pour 500\$!



# Antenne de Ewen



# 1<sup>ère</sup> détection de la raie à 21cm

356

NATURE

September 1, 1951 VOL. 168

H. I. EWEN  
E. M. PURCELL

## OBSERVATION OF A LINE IN THE GALACTIC RADIO SPECTRUM

Radiation from Galactic Hydrogen at  
1,420 Mc./sec.

$\pm 5$  kc., was displaced some  
laboratory value, and this sh  
observing period. Both the s  
are reasonably well accounted

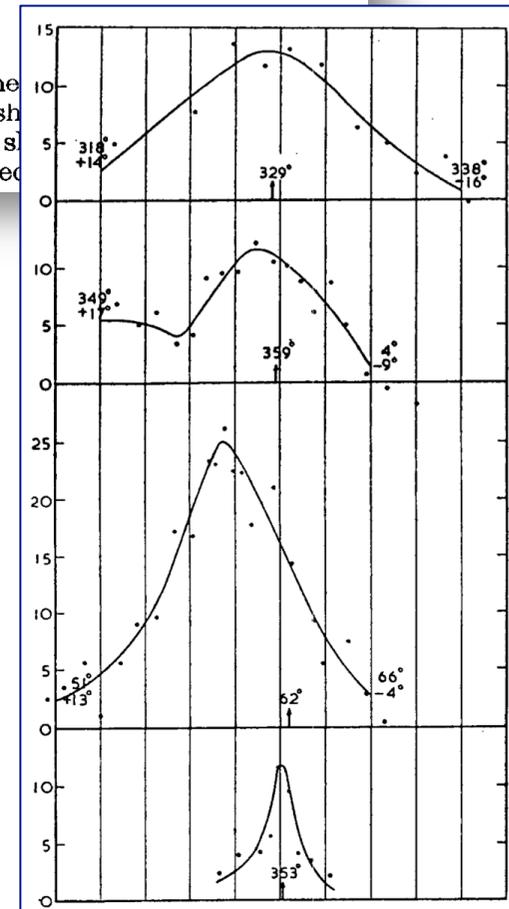
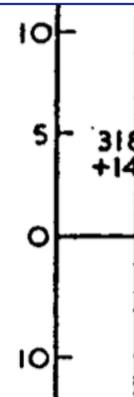
THE ground-state of the hydrogen atom is a

No. 4270 September 1, 1951 NATURE

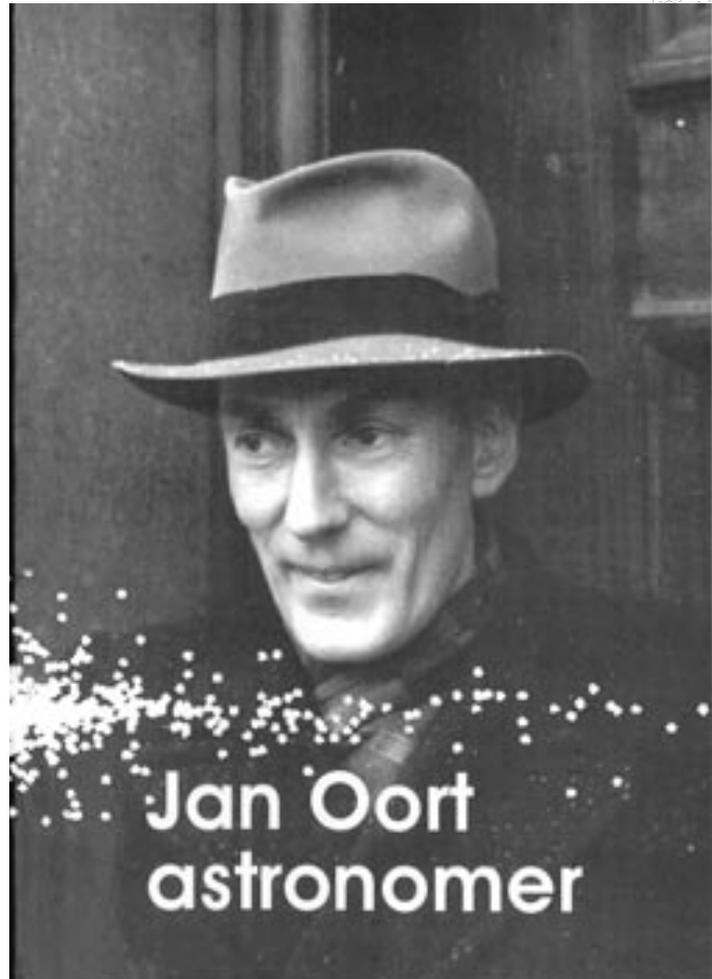
## The Interstellar Hydrogen Line at 1,420 Mc./sec., and an Estimate of Galactic Rotation

C. A. MULLER  
J. H. OORT

FOLLOWING a suggestion made by Dr. H. C. van de Hulst in 1944<sup>1</sup>, attempts have been made to measure the radiation at 1,420 Mc./sec. ( $\lambda 21$  cm.) emitted by atomic interstellar hydrogen. The first experimental evidence for the presence of this interstellar emission line was obtained by Ewen and Purcell on March 25, 1951 (see the preceding communication). In the Netherlands, the first successful measurements were made on May 11.



# Début de la cartographie 3D de notre galaxie



galaxie

NO. 76

1958

OORT

411

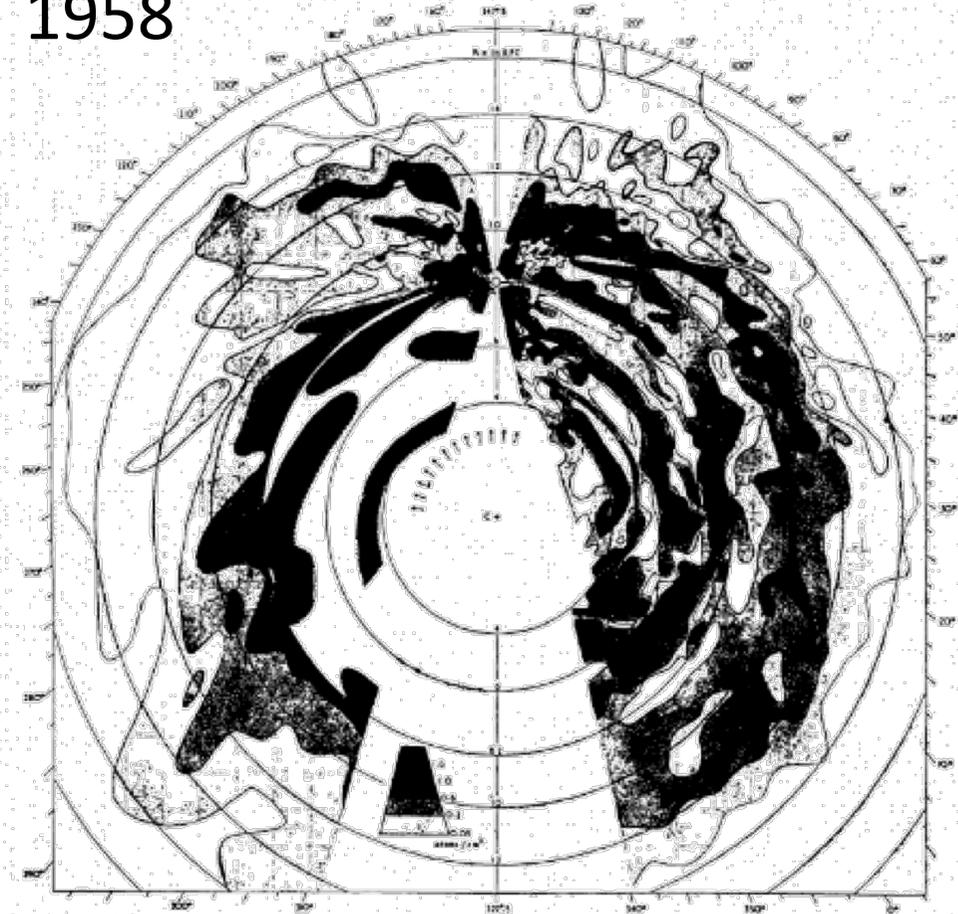
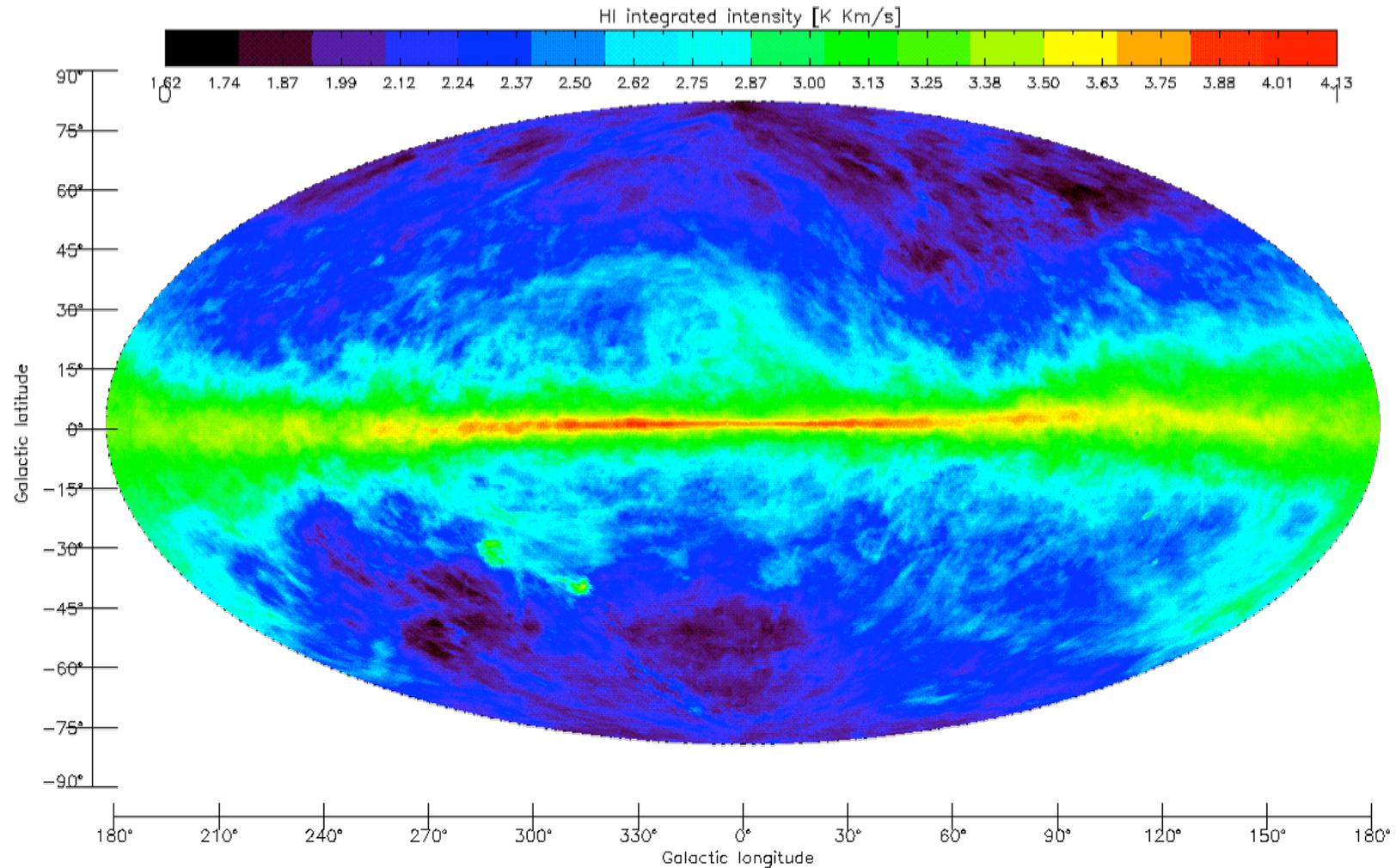


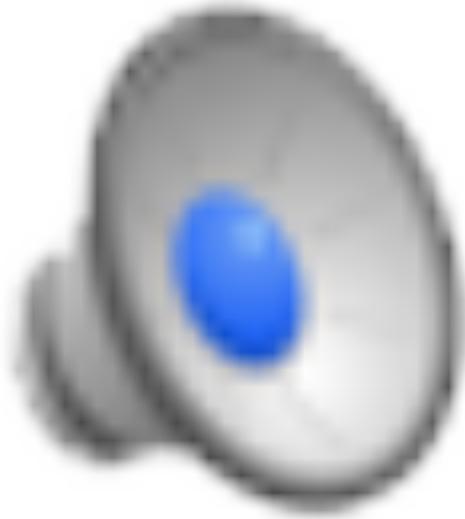
FIG. 1. Distribution of neutral hydrogen in the galactic system.

# Intensité HI



**Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic HI**  
Télescopes: Dwingeloo (25m) et Villa Elisa (30m)

# Rotation différentielle de notre Galaxie



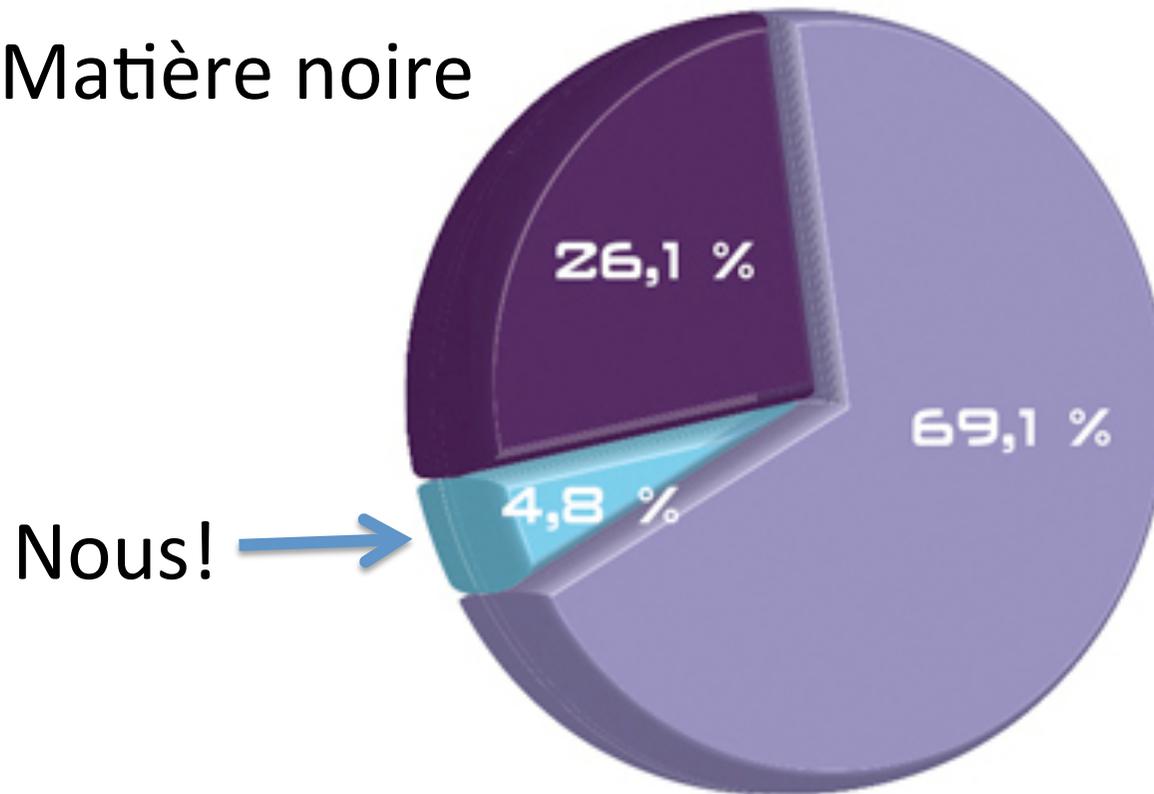
# Comment voir la matière noire?



# Contenu de l'Univers



Matière noire



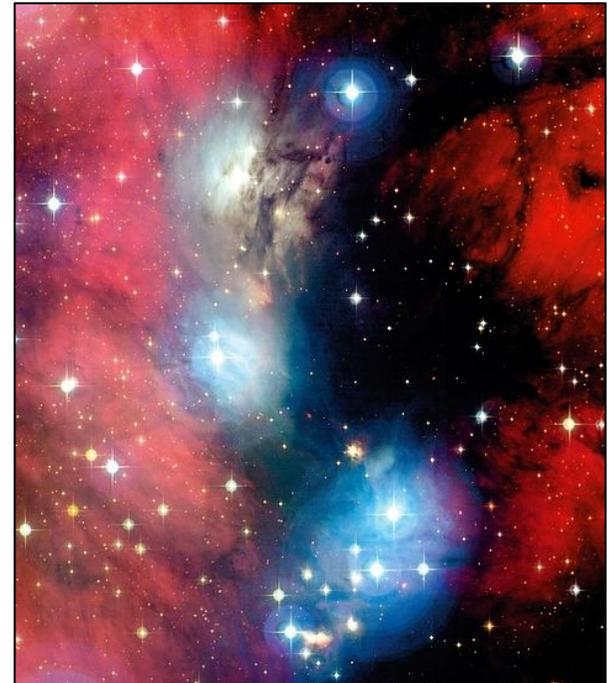
Nous! →

Energie noire

■ Matière noire   ■ Baryons   ■ Energie noire

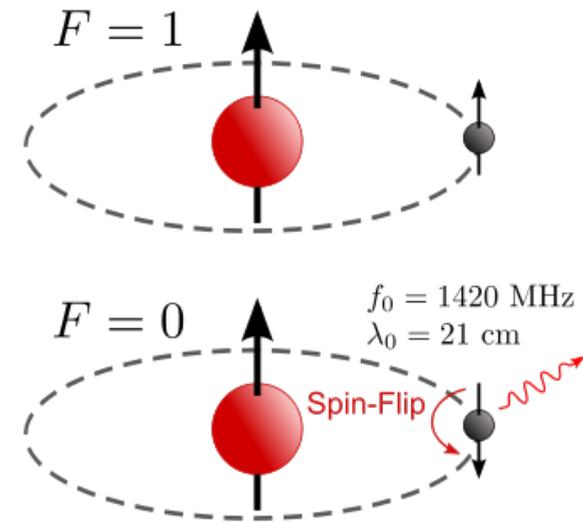
## 2. Utilisation de la raie à 21cm pour cartographier notre Galaxie

- Hydrogène: élément le plus abondant, 90%
  - Hélium: 9%
  - Autres éléments plus lourds: 1%
- Milieu interstellaire: région HII
  - Gaz ionisé par les étoiles massives
  - Emission H $\alpha$ :  $\lambda=656\text{nm}$  (rouge)



# La raie à 21cm

- Transition entre 2 sous-niveaux de l'état fondamental de H:
  - Spins du proton et de l'électron parallèles ou non
  - Durée de vie de l'atome sur le niveau: 11 millions d'années!
  - Forte abondance H: raie observable

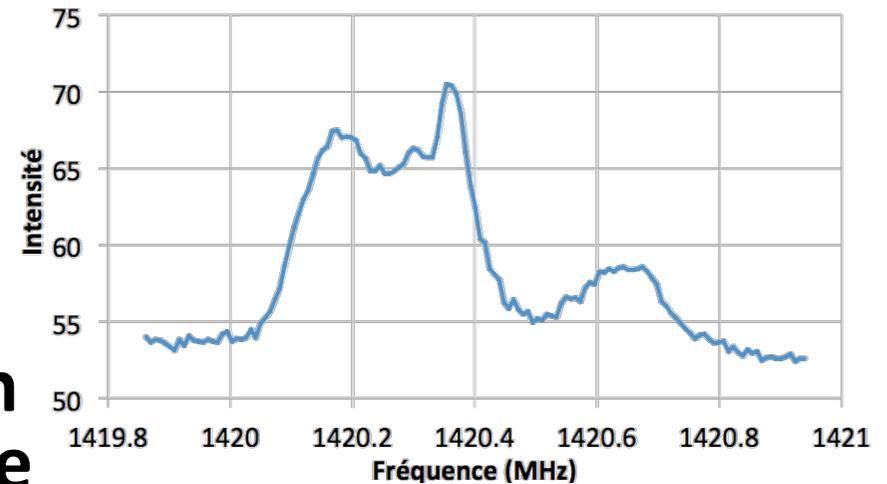


$$\nu \approx 1420.405 \text{ MHz}$$

$$\lambda \approx 21 \text{ cm}$$

# Cartographie de notre Galaxie à 21cm

- Emission des nuages d'H du milieu interstellaire le long de la ligne de visée
  - Raie complexe
- **Avantage: pas d'extinction due aux poussières dans le domaine radio!**
  - Observation possibles **jusqu'à 30kpc (soit le diamètre de notre Galaxie)**
  - Intensité de la raie: densité du nuage
  - Distance: vitesse radiale par décalage Doppler



(D. Elbaz)



# Effet Doppler

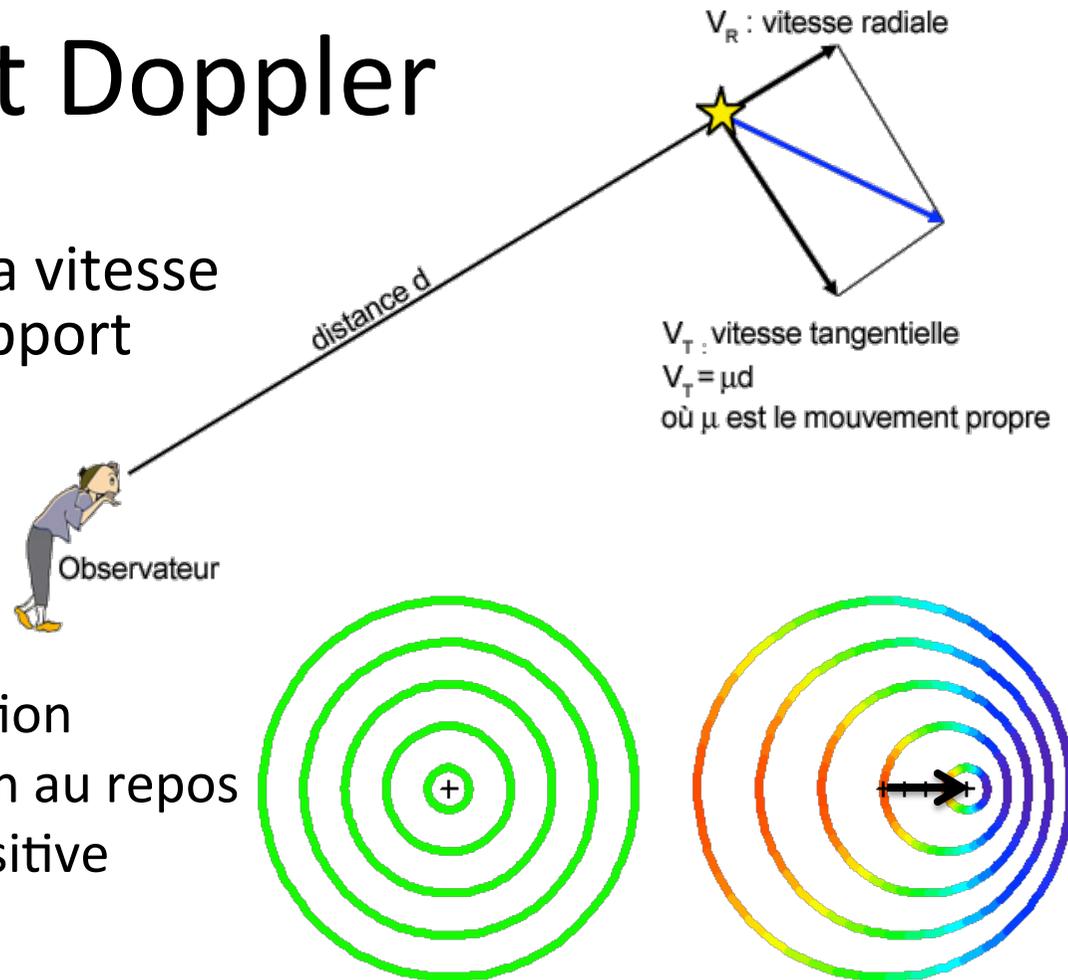
- Décalage spectral dû à la vitesse radiale de l'objet par rapport à l'observateur

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = \frac{\Delta \nu}{\nu_0} = - \frac{v_R}{c}$$

- $\nu$ : fréquence d'observation
- $\nu_0$ : fréquence d'émission au repos
- Rem: vitesse radiale positive si l'objet s'éloigne

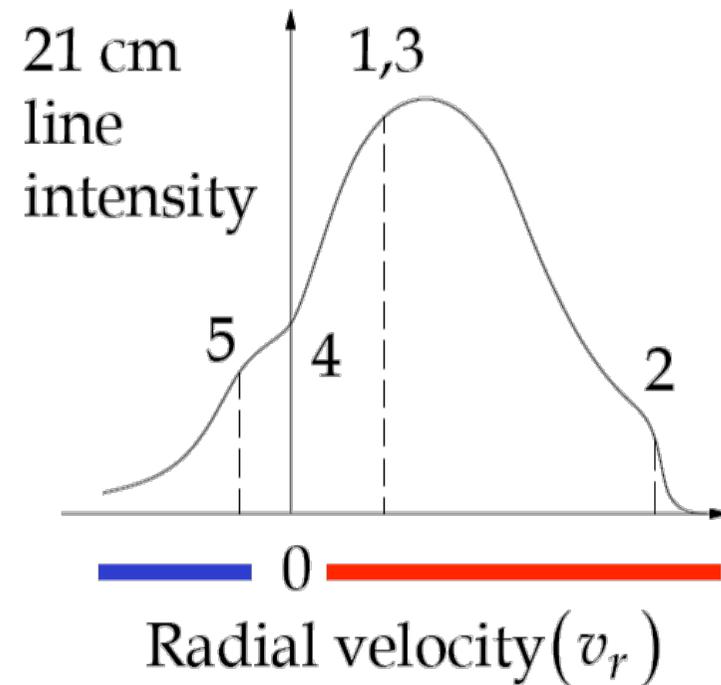
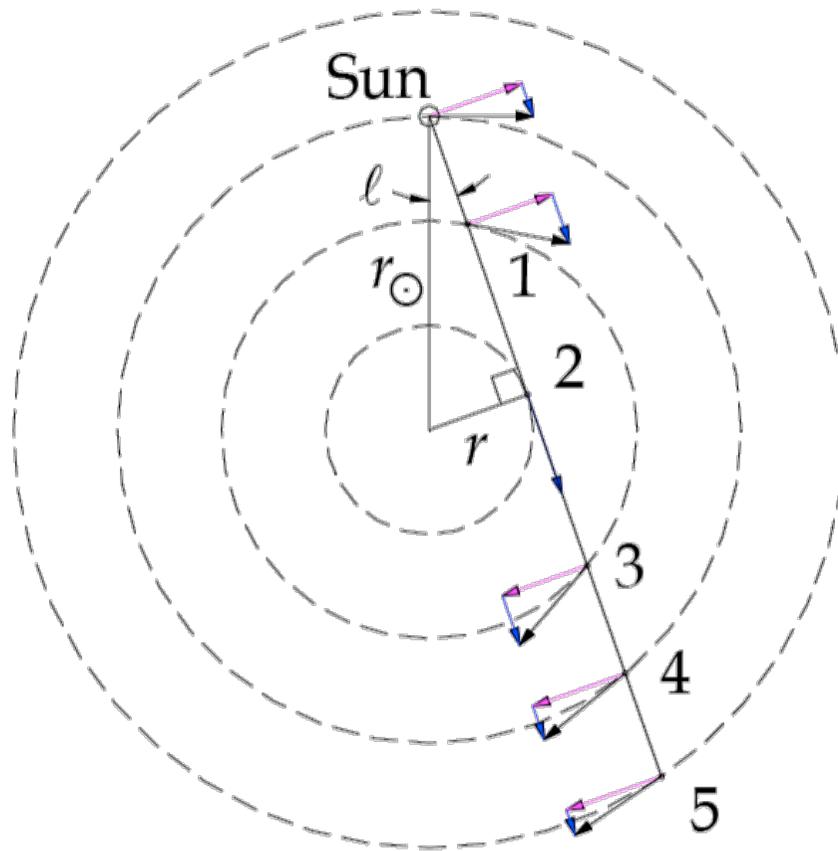
- Eloignement:

- Décalage vers les basses fréquences donc vers les grandes longueurs d'onde



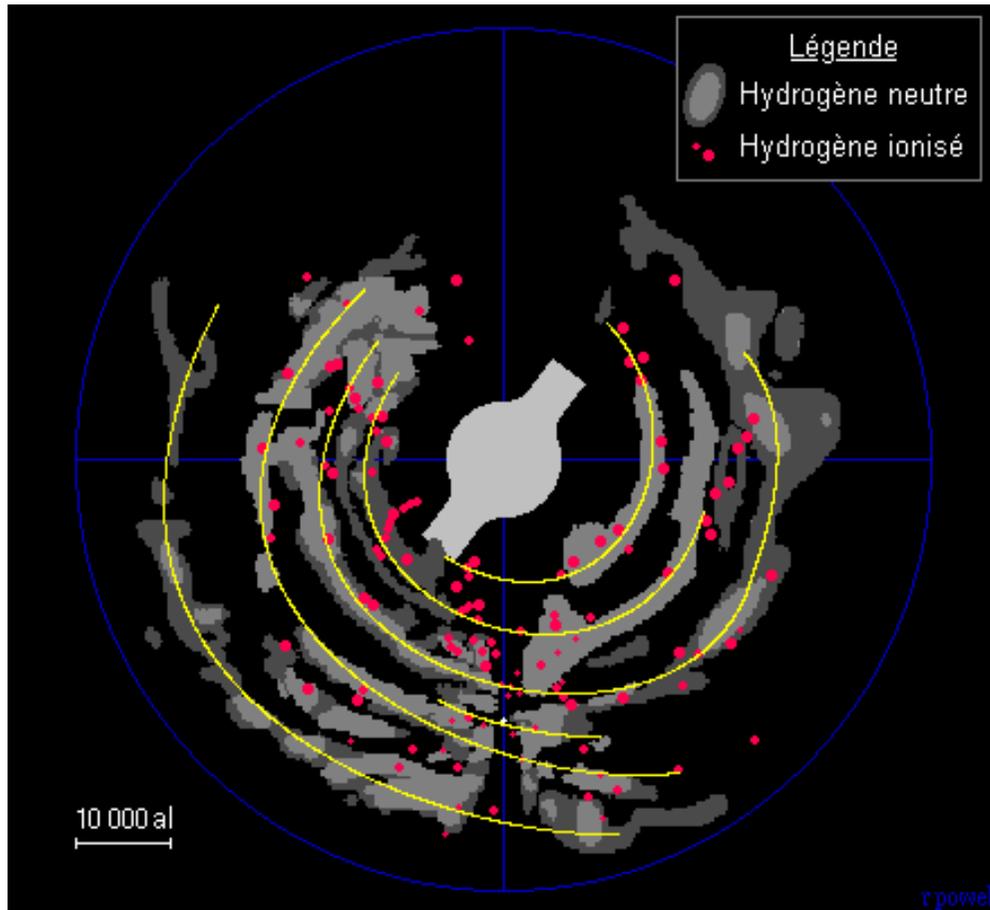
Rappel:  $\lambda = \frac{c}{\nu}$

# Cartographie de notre Galaxie avec la raie à 21cm



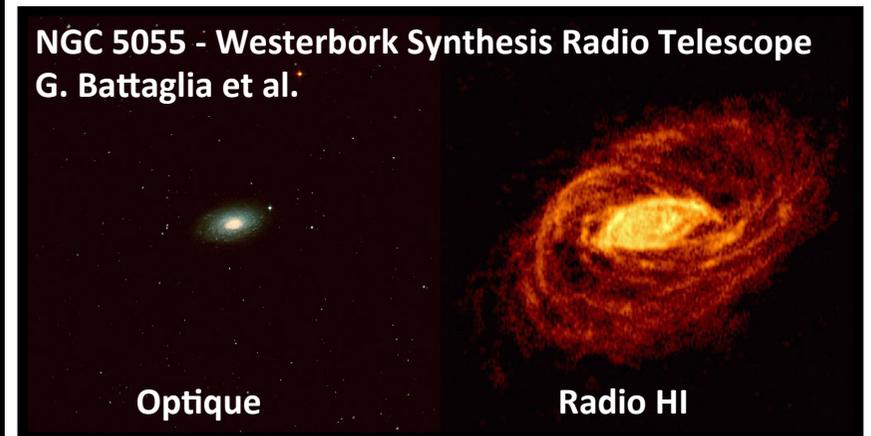
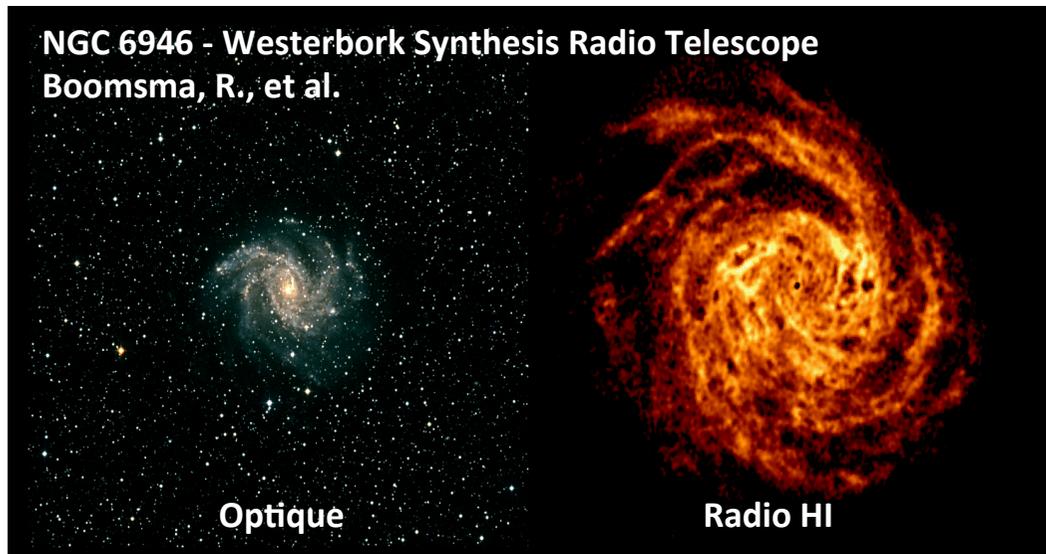
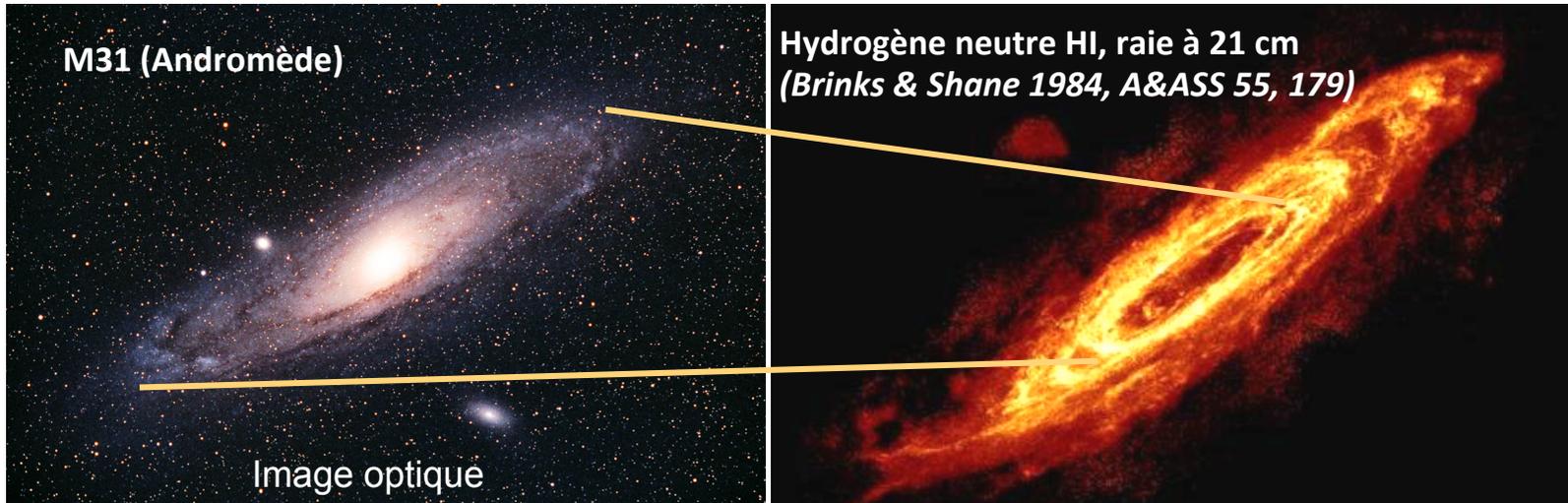
(D. Elbaz)

# Cartographie de notre Galaxie avec la raie à 21cm



(D. Elbaz)

# Et d'autres galaxies!

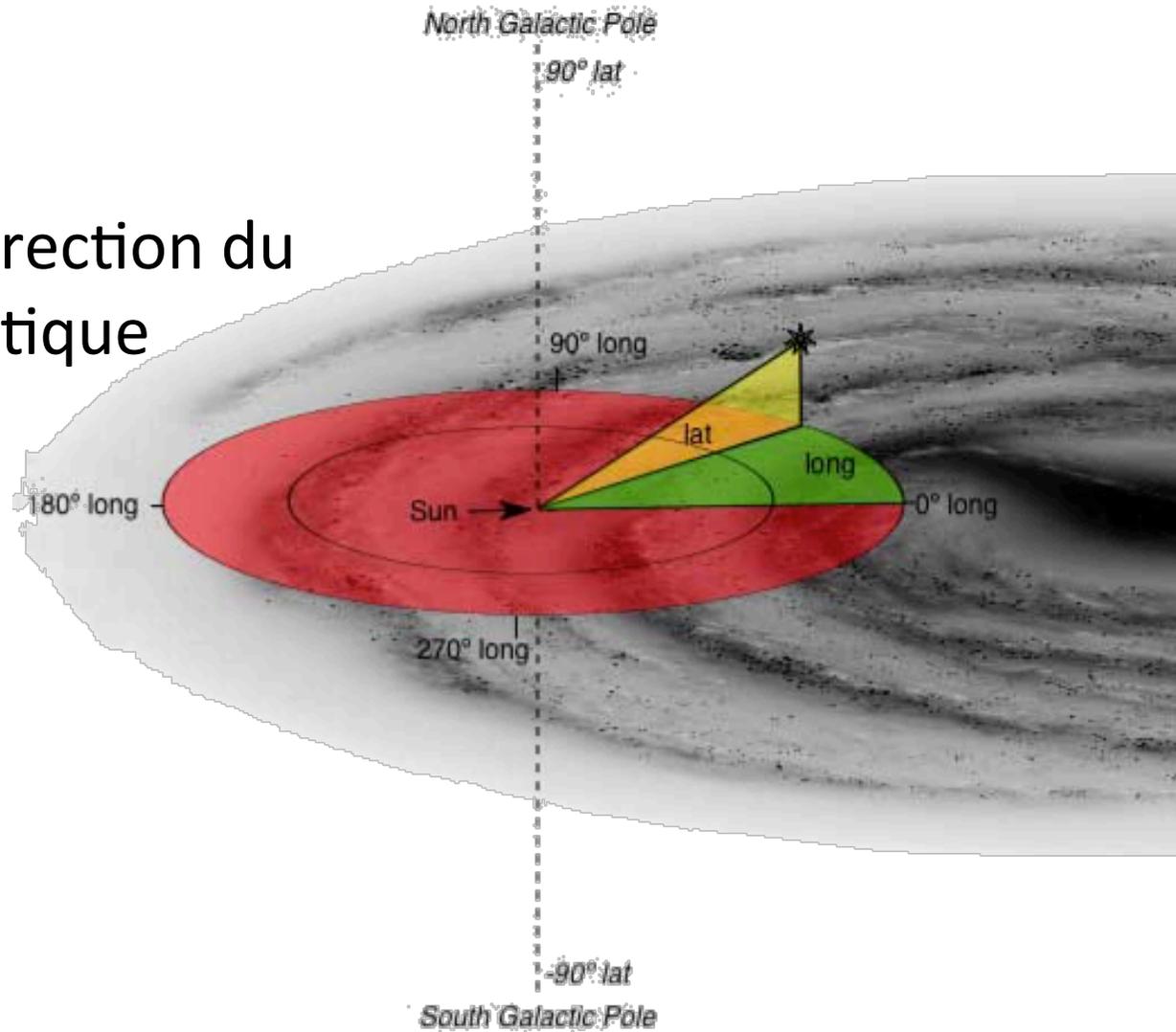


(D. Elbaz)



# Coordonnées galactiques

- Longitude:  $l$ 
  - $0^\circ$  dans la direction du centre galactique
- Latitude:  $b$





# Détermination de la courbe de rotation de notre Galaxie

- Hypothèses:
  - Observateur en S
  - V décroît avec R
  - Nuage M dans le plan galactique

$$\left\{ \begin{array}{l} V_0 \approx 220 \text{ km.s}^{-1} \\ R_0 \approx 8.5 \text{ kpc} \end{array} \right.$$

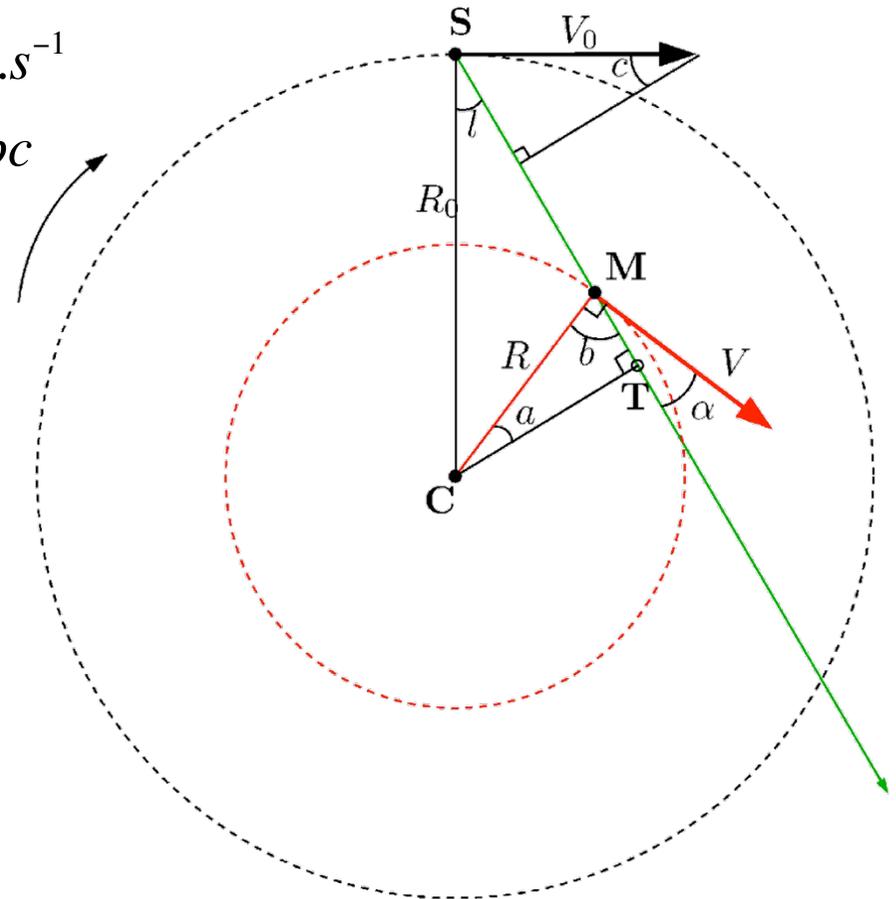
- Vitesse radiale de M par rapport à S:  $V_r = V \times \cos \alpha - V_0 \times \sin l$

or:  $CT = R_0 \times \sin l = R \times \cos \alpha$

d'où:  $V_r = V \frac{R_0}{R} \sin l - V_0 \sin l$

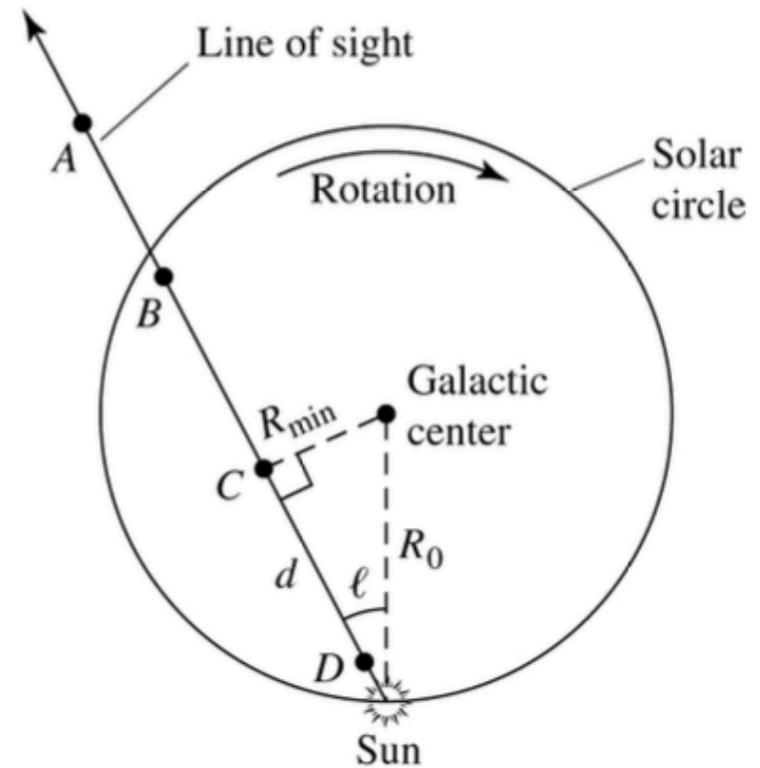
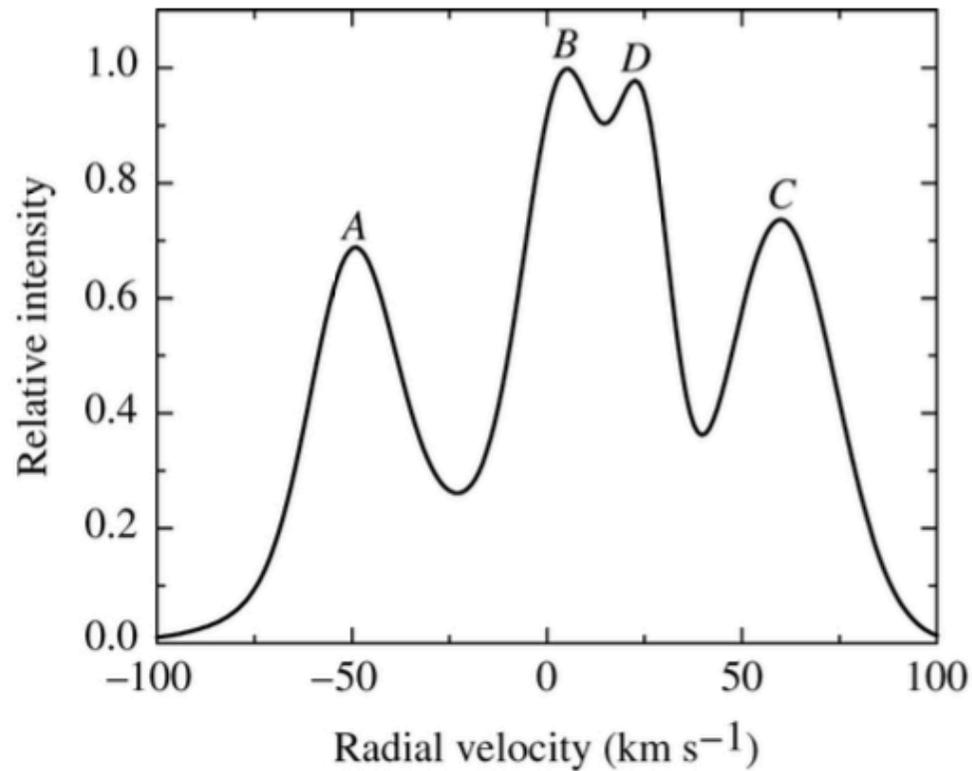
- $V_r$  max pour V max donc R min:  
**point tangentiel T**

$$\left\{ \begin{array}{l} R = R_0 \sin l \\ V = V_{r,\text{max}} + V_0 \sin l \end{array} \right.$$

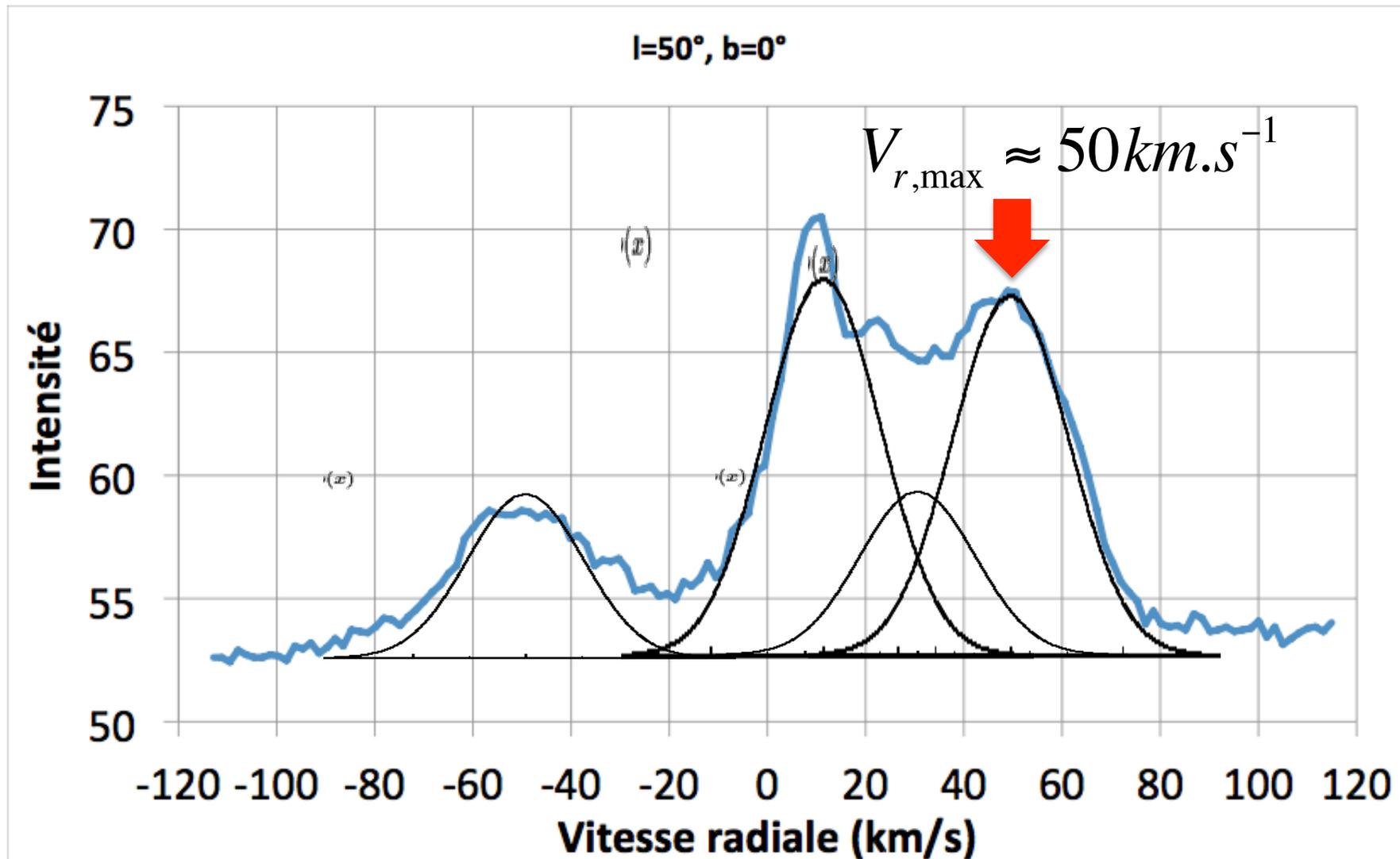


Valable uniquement pour  $|l| < 90^\circ$

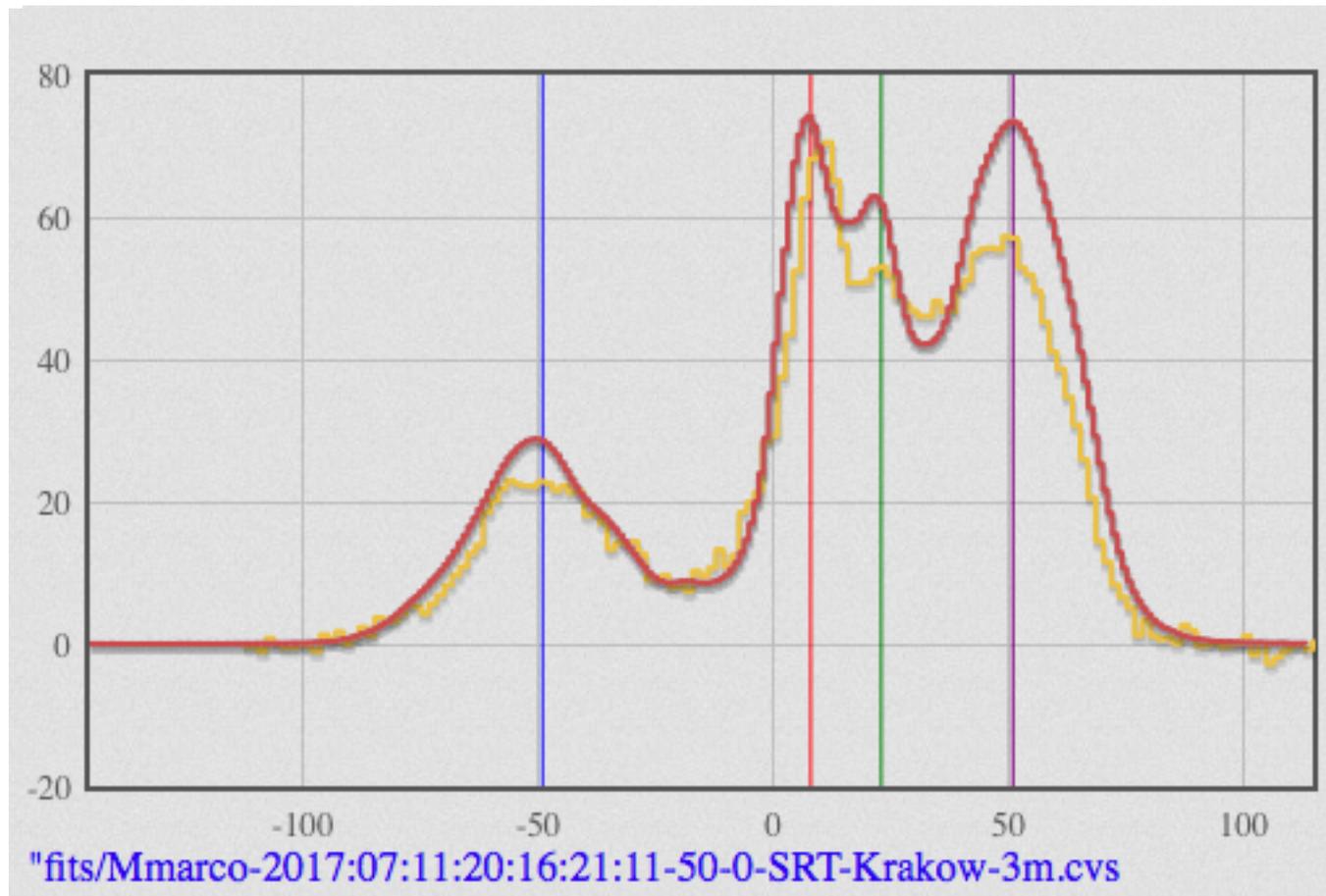
# Structure de l'émission à 21cm



# Détermination de la courbe de rotation de notre Galaxie



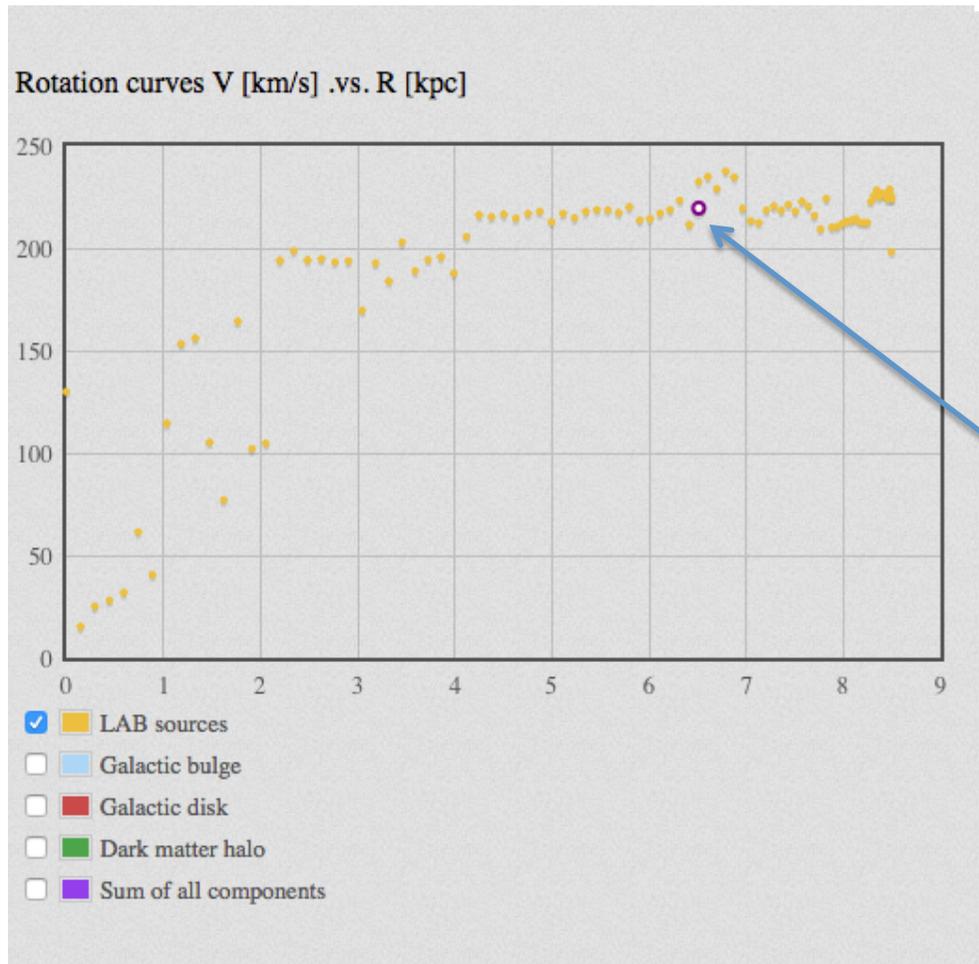
# Détermination de la courbe de rotation de notre Galaxie



$l=50^\circ$   
 $b=0^\circ$

<http://euhou.obspm.fr>

# Détermination de la courbe de rotation de notre Galaxie



$$\begin{cases} R = R_0 \sin l \\ V = V_{r,\max} + V_0 \sin l \end{cases}$$



$$\begin{cases} R = 6.5 \text{ kpc} \\ V = 219 \text{ km.s}^{-1} \end{cases}$$

<http://euhou.obspm.fr>



# Modélisation de la courbe de rotation d'une galaxie

- Hypothèses: répartition sphérique de la masse
  - Répartition dans le halo
- Objet de masse  $m$  à une distance  $R$  du centre galactique

- Loi de Newton :  $F_g = m \frac{GM(<R)}{R^2}$

- $M(<R)$ : masse à l'intérieur de la sphère de rayon  $R$

- $G$ : constante de gravitation ( $6,67 \cdot 10^{-11}$  USI)

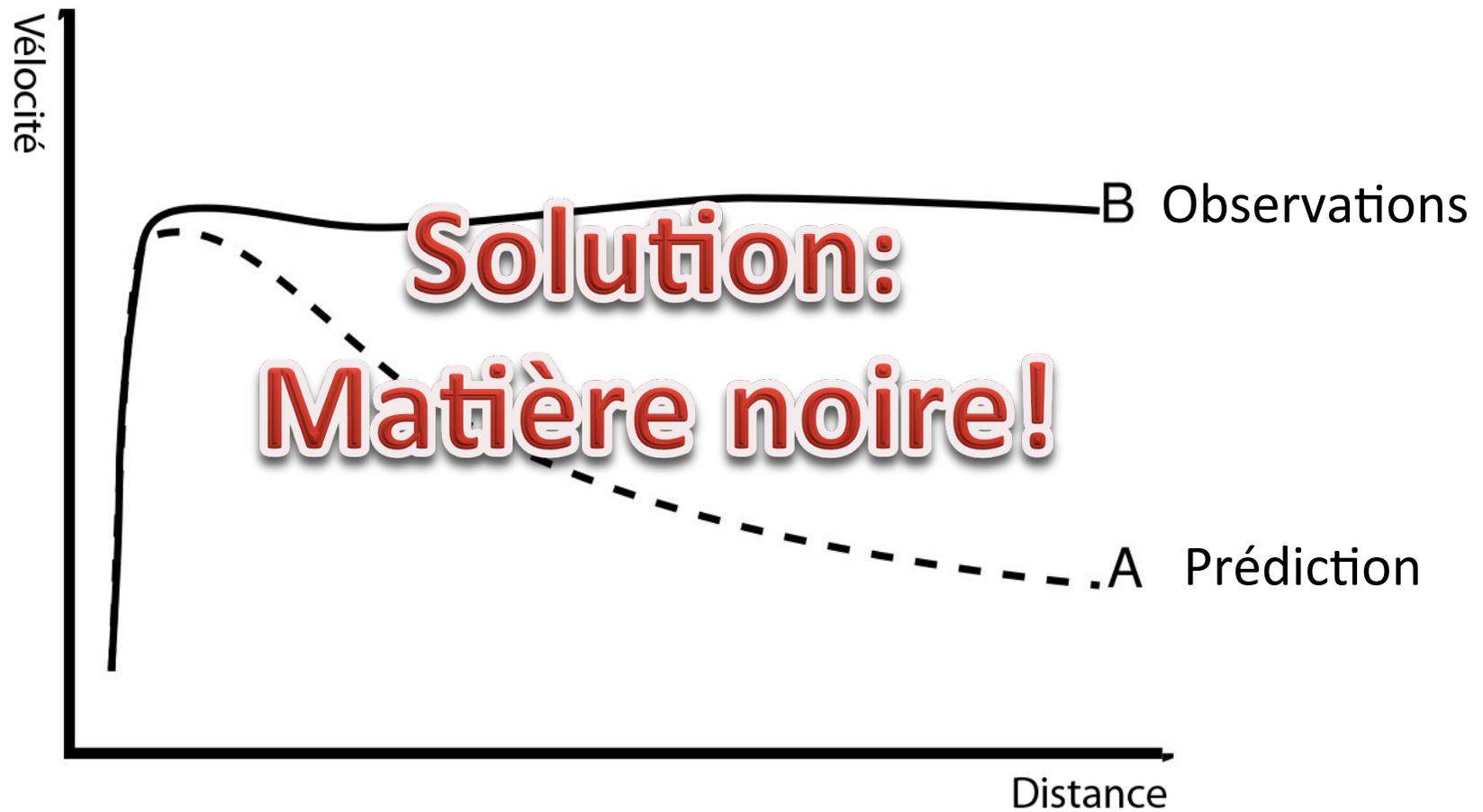
- Principe fondamental de la dynamique:  $F_g = ma_c = m \frac{V^2}{R}$

- Vitesse:

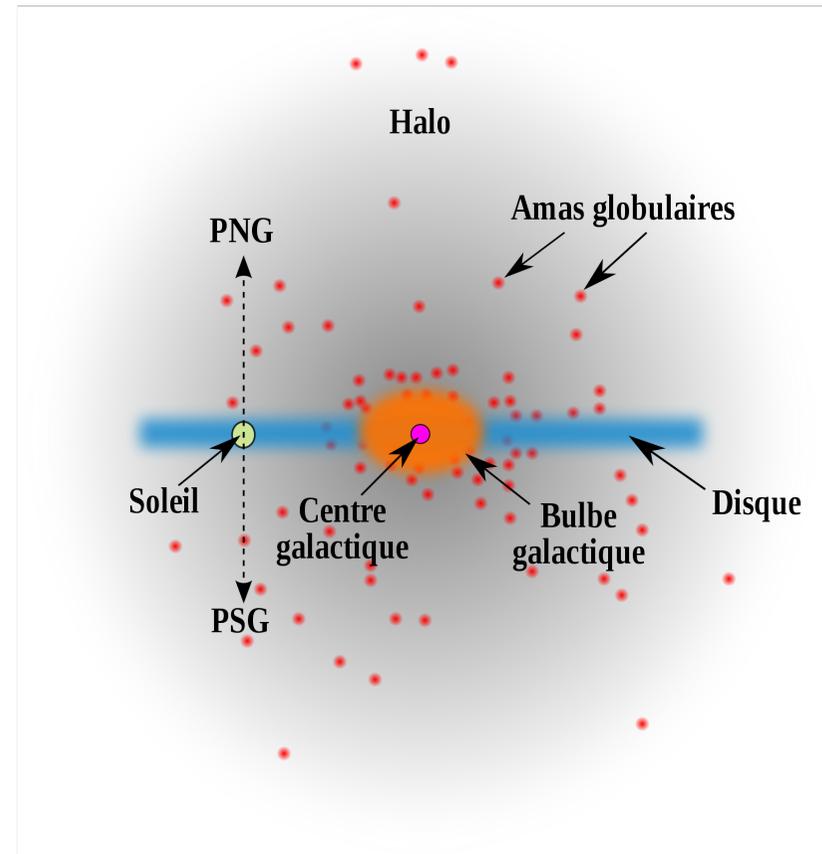
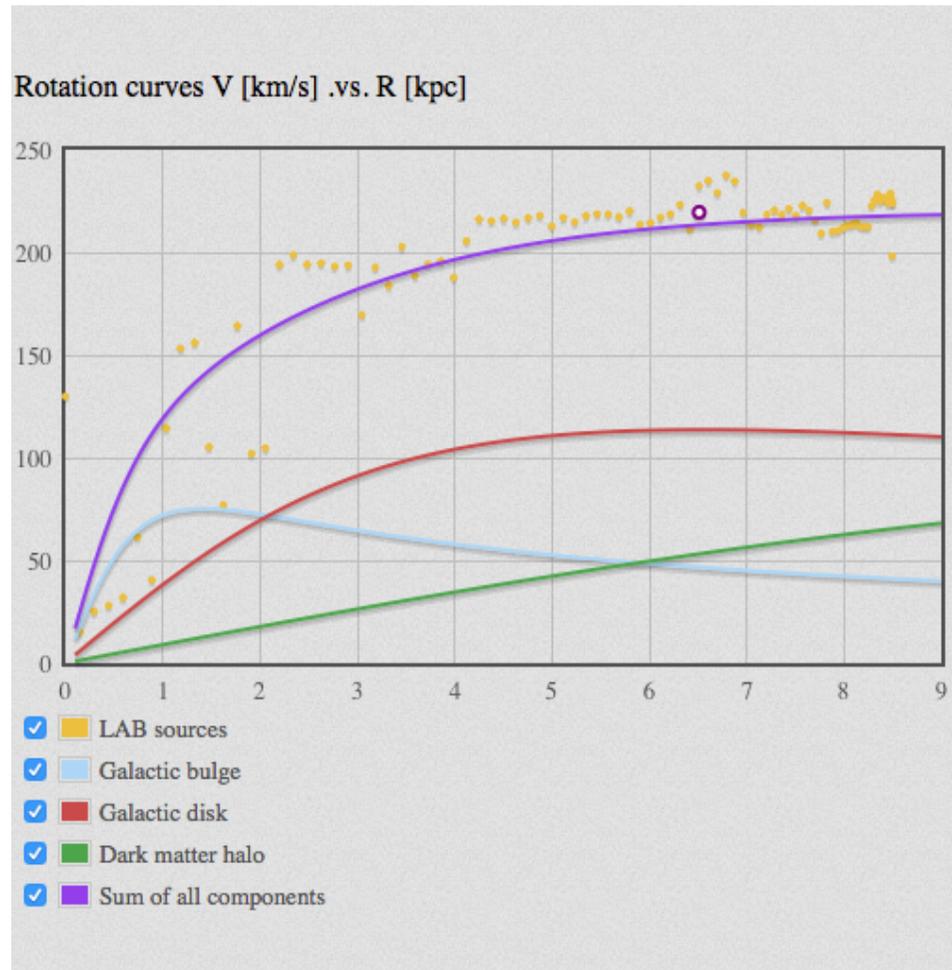
$$V = \sqrt{\frac{GM(<R)}{R}}$$

**Décroit avec la distance**

# Comparaison observations et prédictions



# Comparaison observations et prédictions



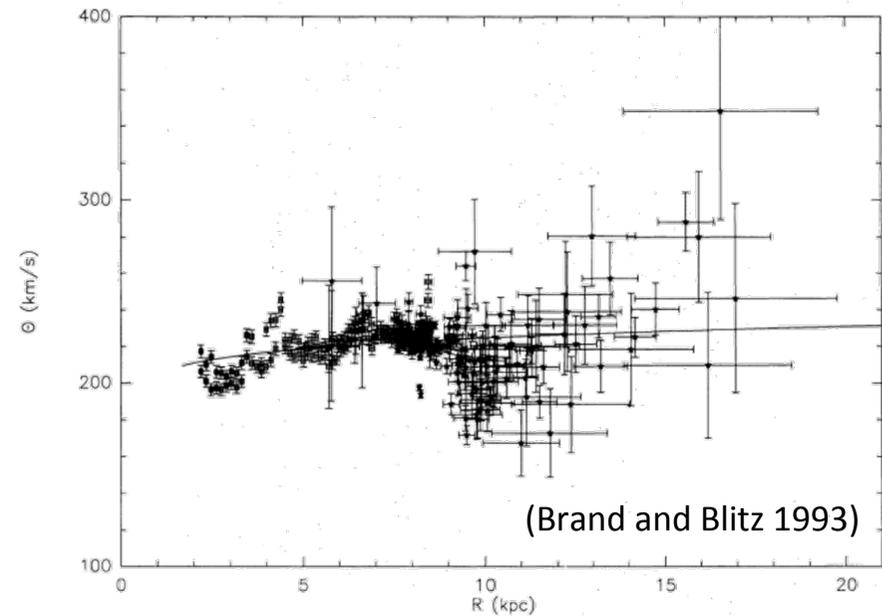
<http://euhou.obspm.fr>

# Estimation de la masse de notre Galaxie

- A partir des équations précédentes:

$$M(< R) = \frac{V^2 R}{G}$$

- $R=17\text{kpc}$ ,  $V=230\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ :  
 $M(<R) = 4,2 \cdot 10^{41}\text{kg}$   
 $= 2,1 \cdot 10^{11} M_{\text{Soleil}}$





# Structure de notre Galaxie

- Rappel: vitesse radiale de M par rapport à S:

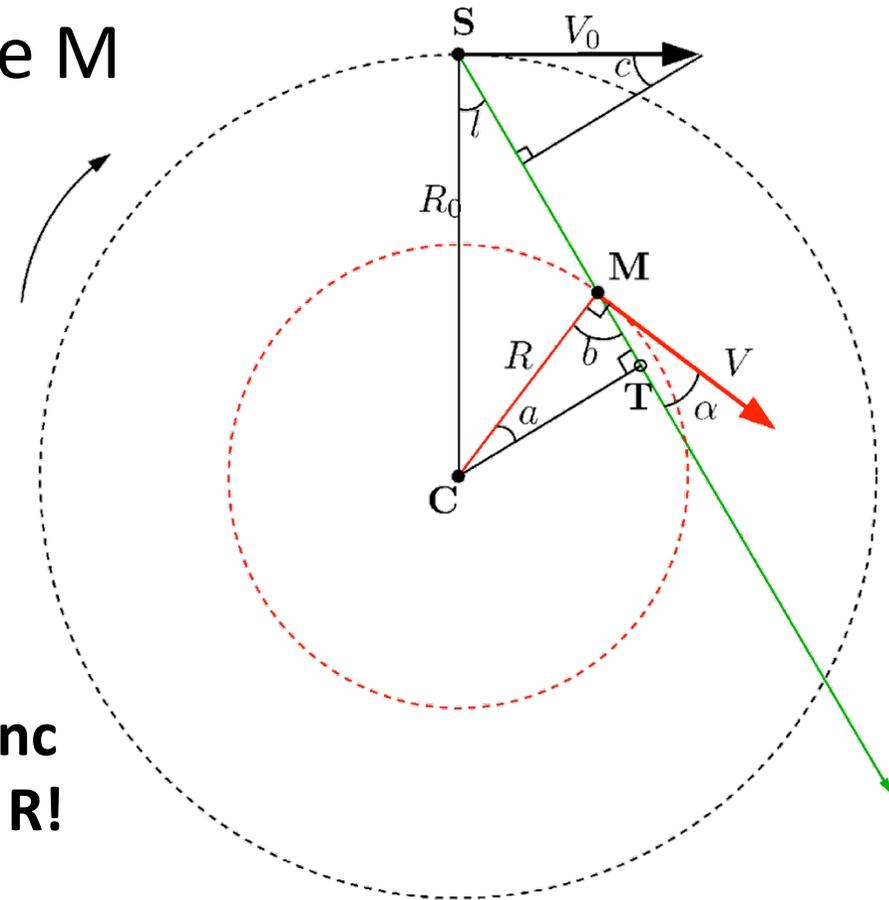
$$V_r = V \frac{R_0}{R} \sin l - V_0 \sin l$$

- Hypothèse:  $V = V_0$

- Ainsi:  $V_r = V_0 \sin l \left( \frac{R_0}{R} - 1 \right)$

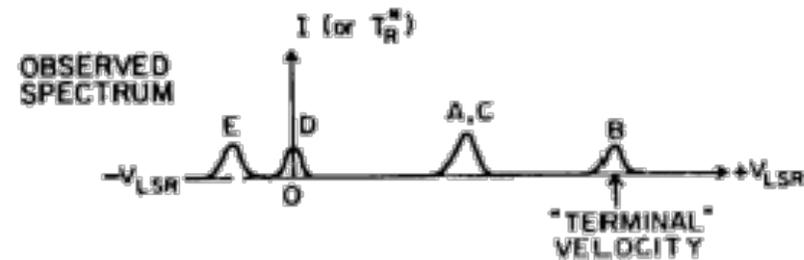
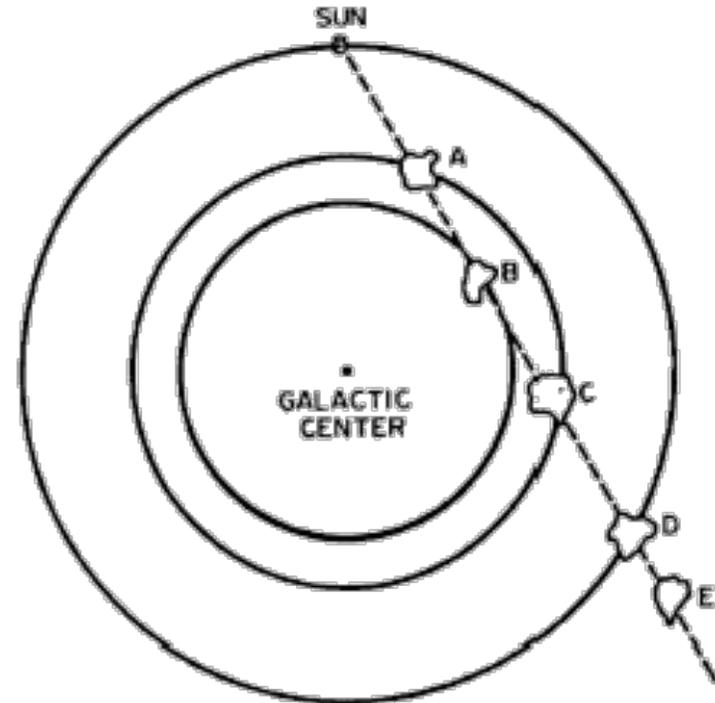
$$R = \frac{R_0 V_0 \sin l}{V_0 \sin l + V_r}$$

**On peut donc déterminer R!**

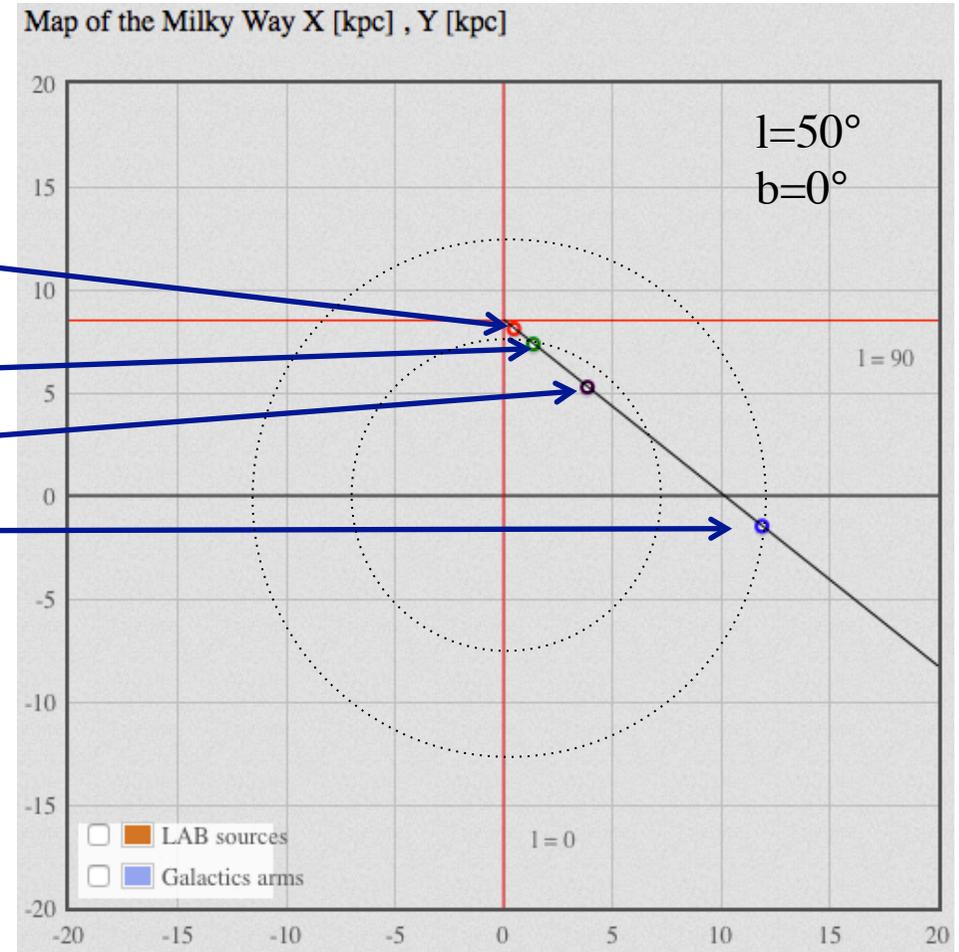
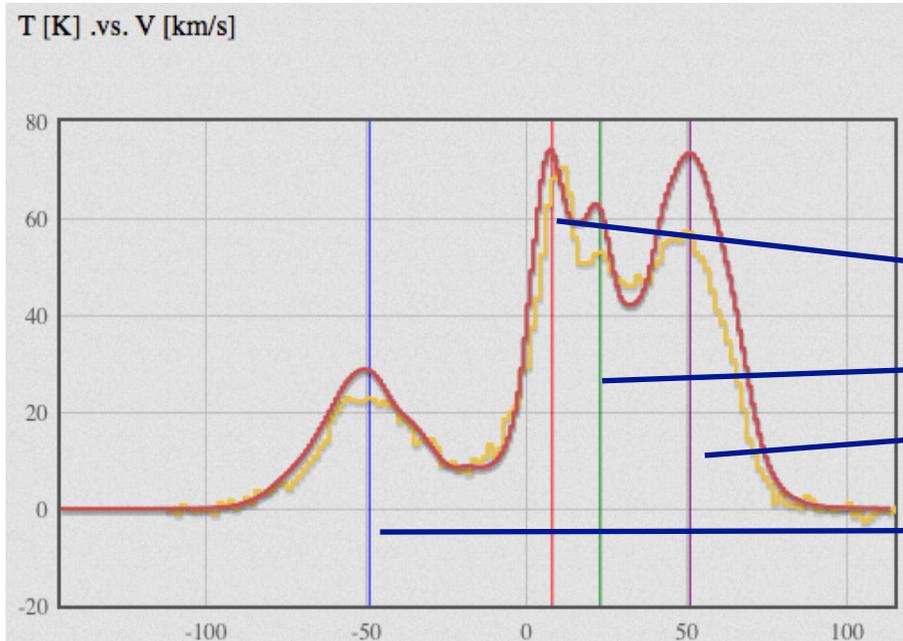


# Structure de notre Galaxie

- Ambiguïté sur la position des nuages A et C
  - La même vitesse radiale
  - On ne peut pas les distinguer
- Solutions:
  - Observations à d'autres latitudes galactiques
  - A défaut, choix de la distance la plus courte
    - Ecrantage



# Structure de notre Galaxie

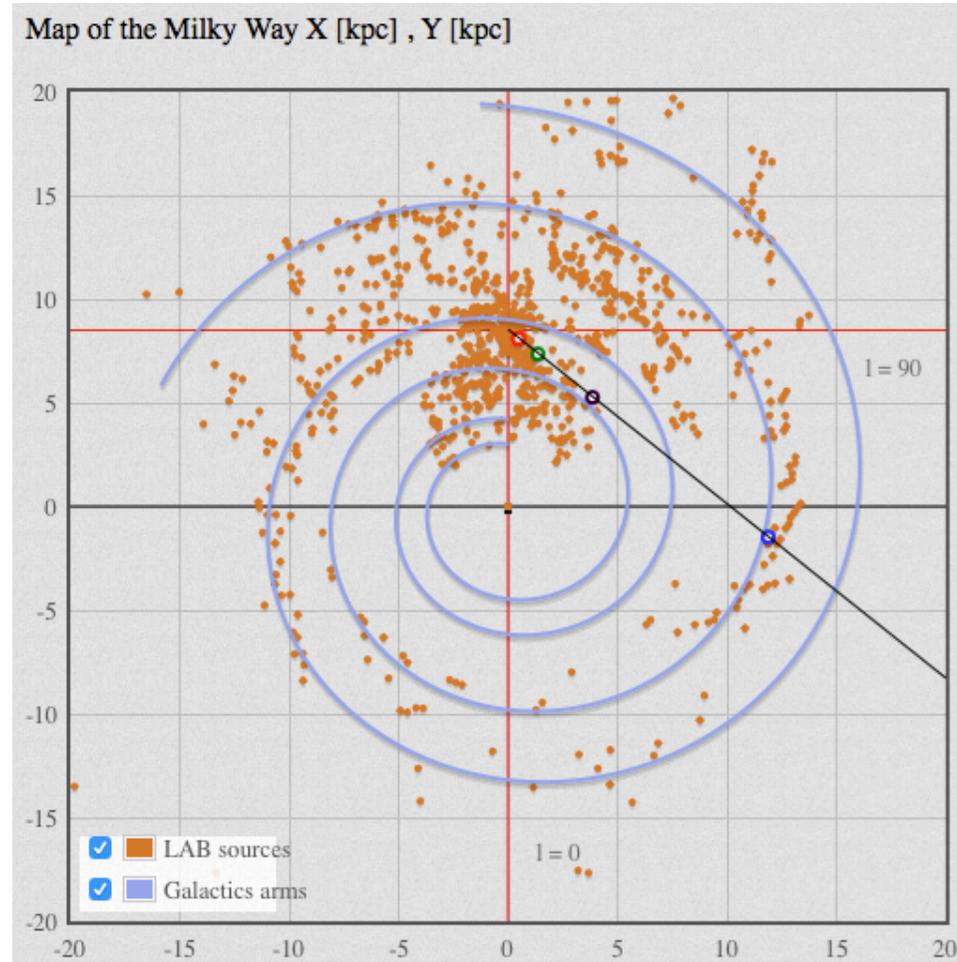


$$V_r = -50 \text{ km.s}^{-1}$$

$$\Rightarrow R = \frac{R_0 V_0 \sin l}{V_0 \sin l + V_r} \approx 12 \text{ kpc}$$

<http://euhou.obspm.fr>

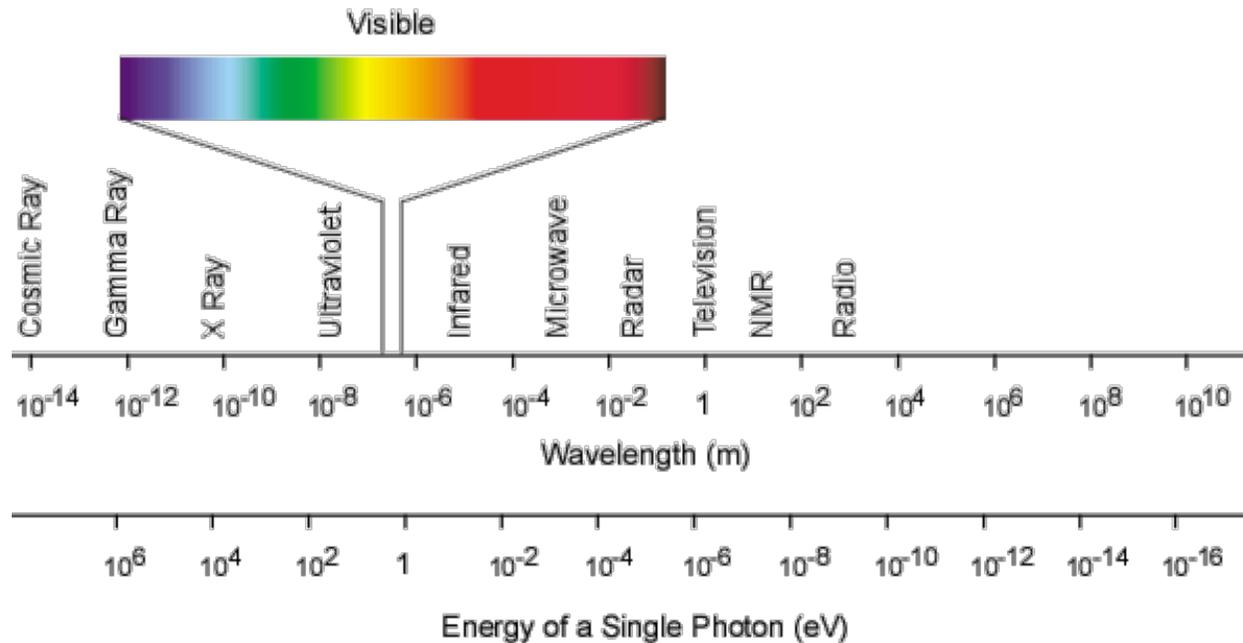
# Structure de notre Galaxie



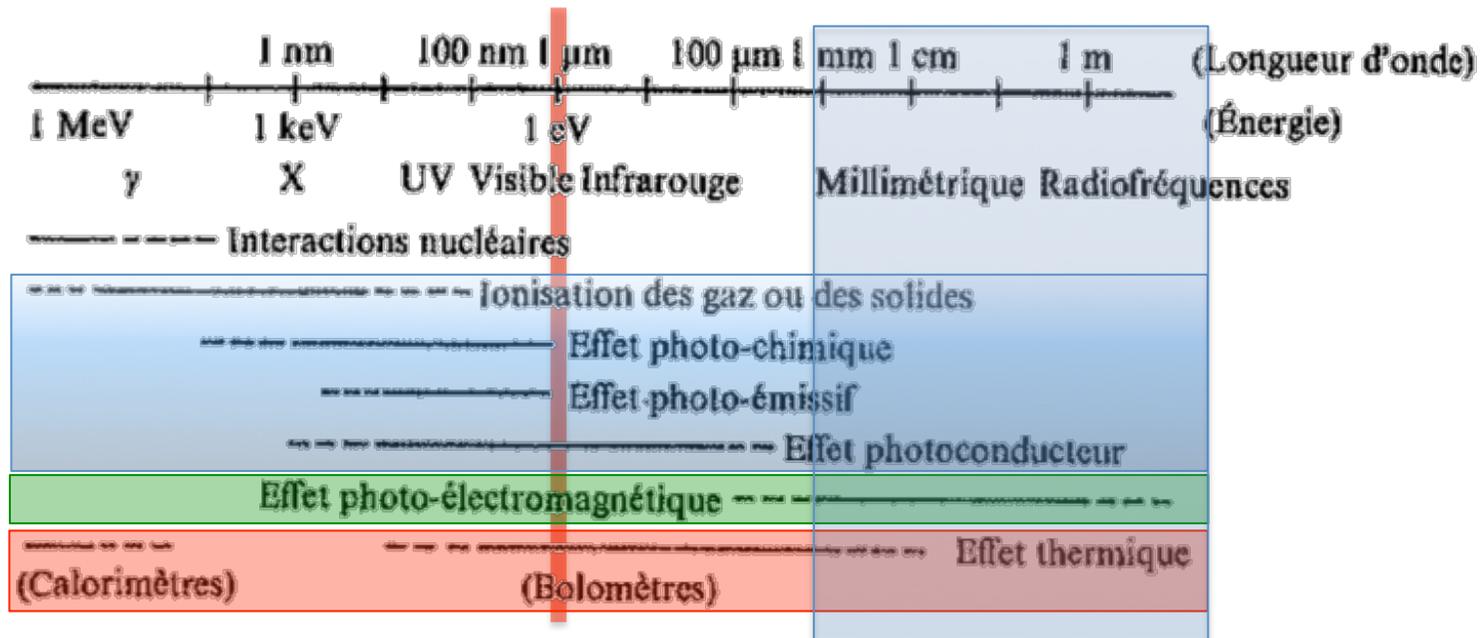
<http://euhou.obspm.fr>

### 3. Méthode de détection dans le domaine radio

- Energie d'un photon à la fréquence  $\nu$ :  $E = h\nu$ 
  - Formule de Planck
  - $h=6,62 \cdot 10^{-34}$  USI

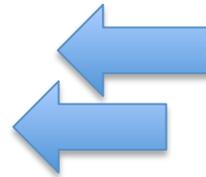


# Interaction des photons avec la matière

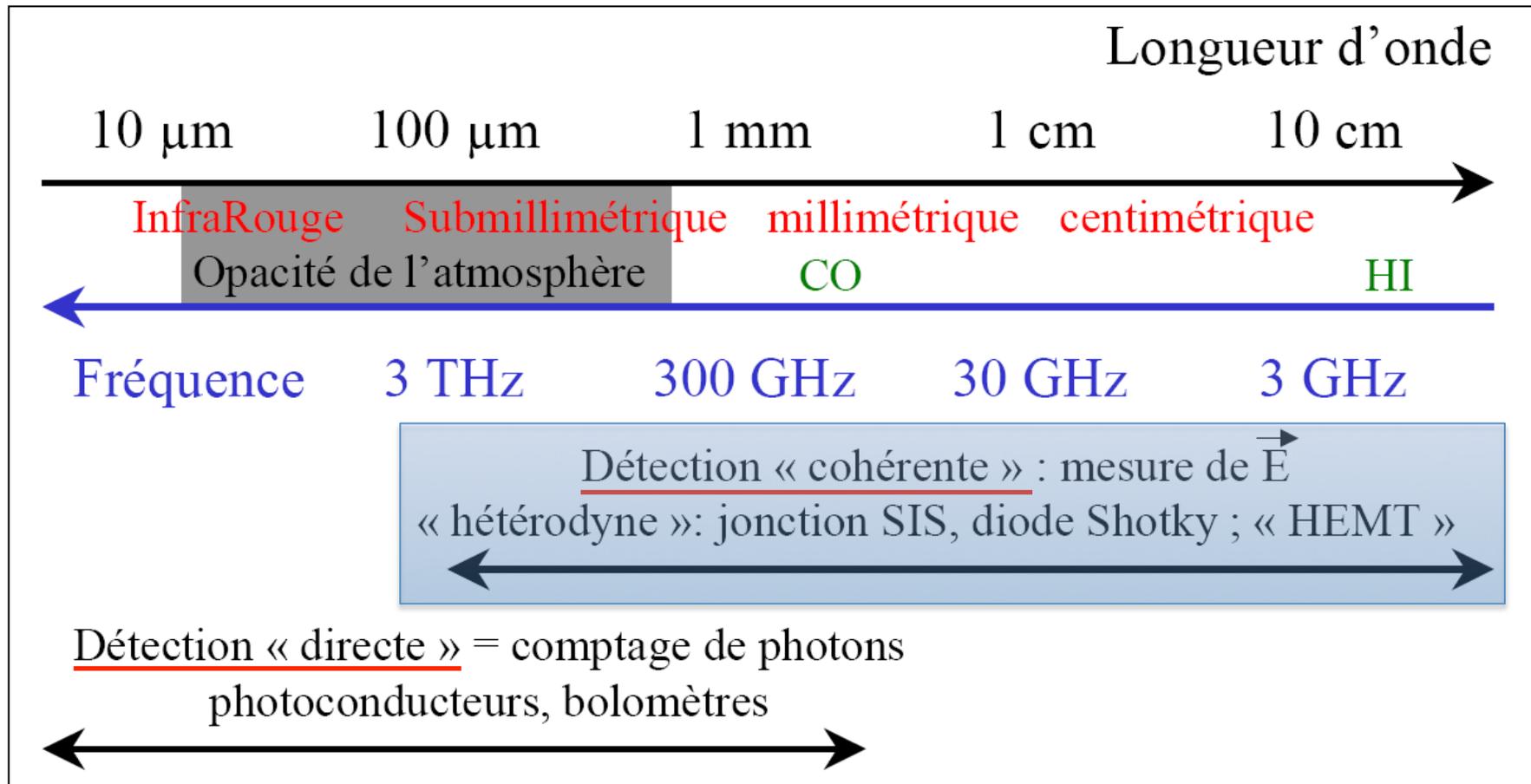


- 3 types de détecteurs:
  - Détecteurs quantiques
  - Détecteurs cohérents
  - Détecteurs thermiques

Domaine radio



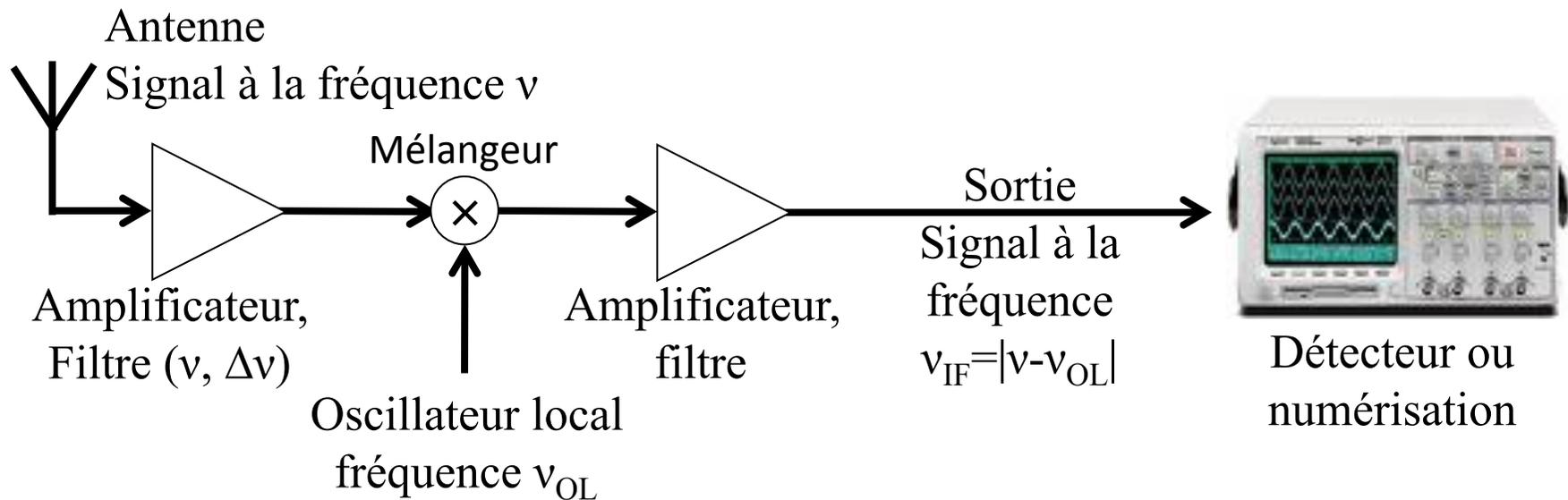
# Méthodes de détection radio



Crédits: M. Giard

# Méthodes radio: détection hétérodyne

- Utilisation de l'électronique HF:



$\nu_{IF}$  : Intermediate Frequency

(Sensibilité intéressante refroidi à 4K jusqu'à environ 100GHz)



# Quelques notions utiles dans le domaine radio...

- **Température d'antenne  $T_a$** 
  - Puissance reçue par le détecteur:  $P = kT_a\Delta\nu$ 
    - Constante de Boltzman:  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  USI
    - $\Delta\nu$ : largeur de bande
  - Température fictive (approximation Rayleigh-Jeans du corps noir)
  - Signal mesuré:  $V = R \times P$ 
    - $V$ : tension à la sortie
    - $R$ : réponse du détecteur
- **Température de bruit:  $T_b$** 
  - Pour  $T_a=0$ ,  $V \neq 0$
  - On écrit alors:  $P = k(T_a + T_b)\Delta\nu$
  - Température système:  $T_{sys} = T_a + T_b$



# Signal détectable le plus faible

- Equation de Dicke (1946):
  - Largeur de bande:  $\Delta\nu$
  - Temps d'intégration:  $\tau$  (durée de la moyenne)

$$T_{\min} \approx \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\tau \Delta\nu}}$$



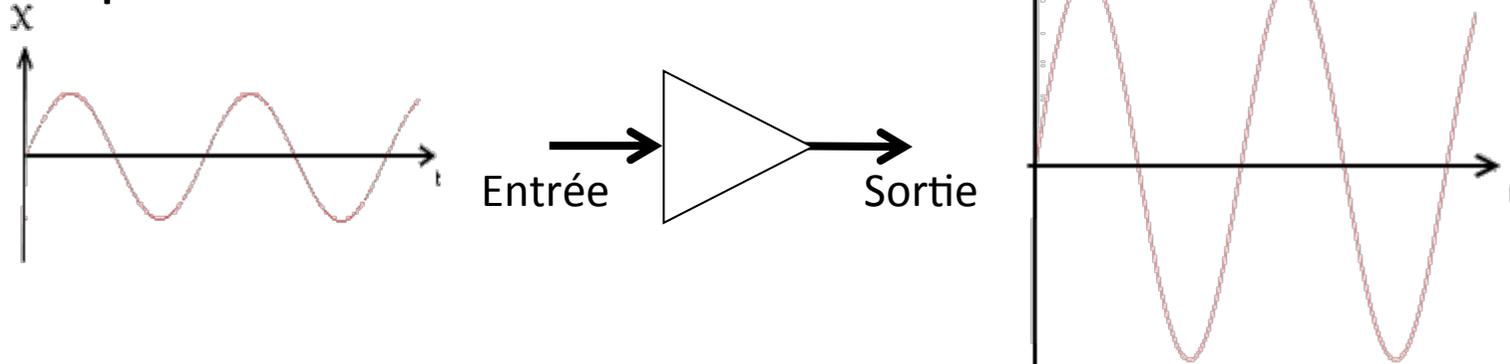
R. H. Dicke (1916–1997)

- Système sensible:
  - Faible température système
  - Grande largeur de bande et temps d'intégration



# Limite quantique

- Amplificateur RF:



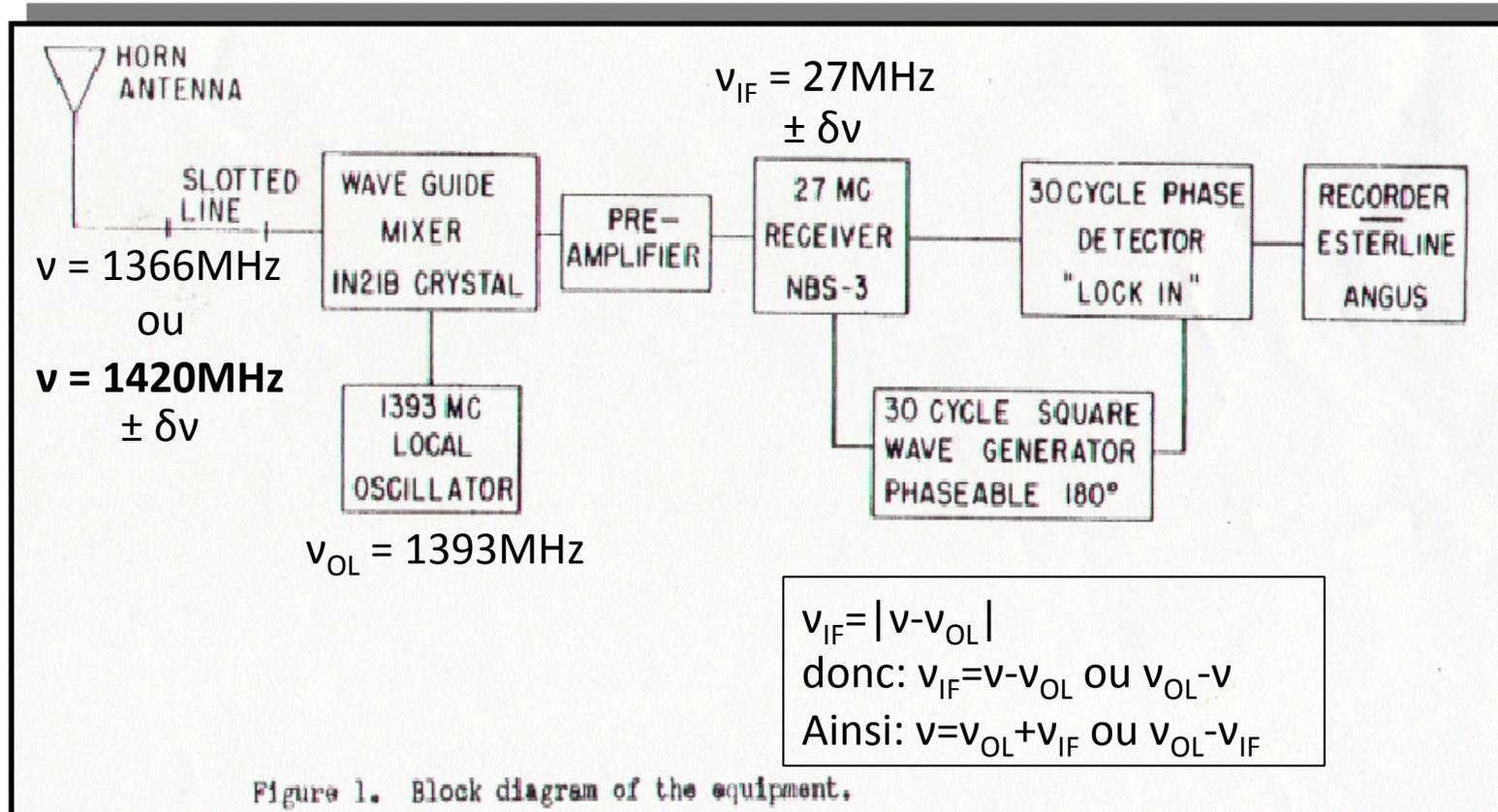
- Heisenberg: impossibilité de connaître l'amplitude et la phase avec une précision infinie

– **Température de bruit minimum:**

$$T_b(\text{minimum}) = \frac{h\nu}{k}$$

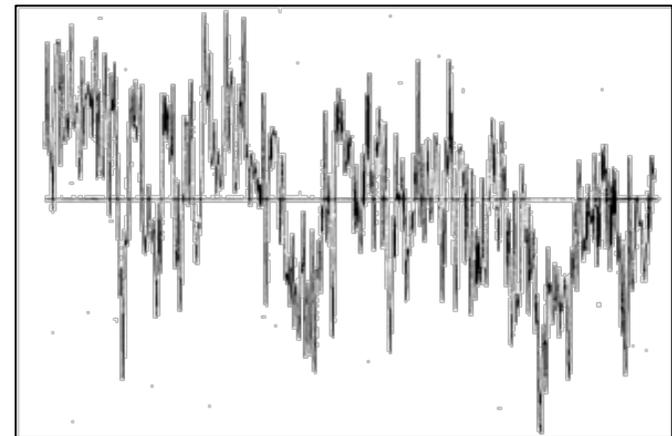
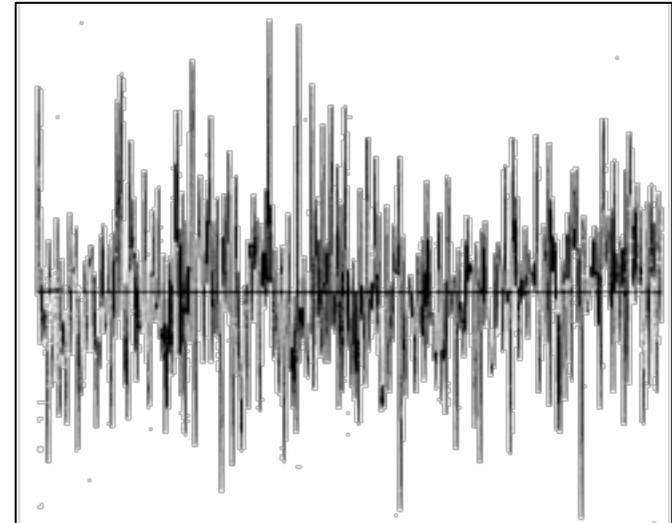
– Environ 0.5K/GHz dans le domaine radio

# Chaîne de détection de Ewen



# Problème du bruit basses fréquences

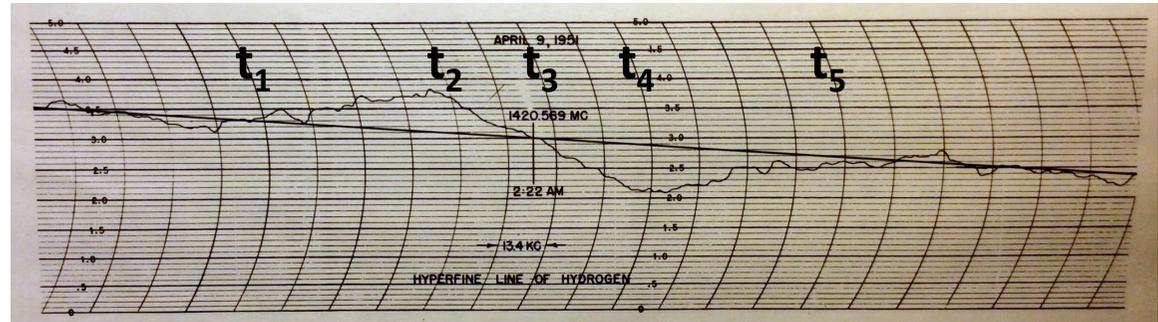
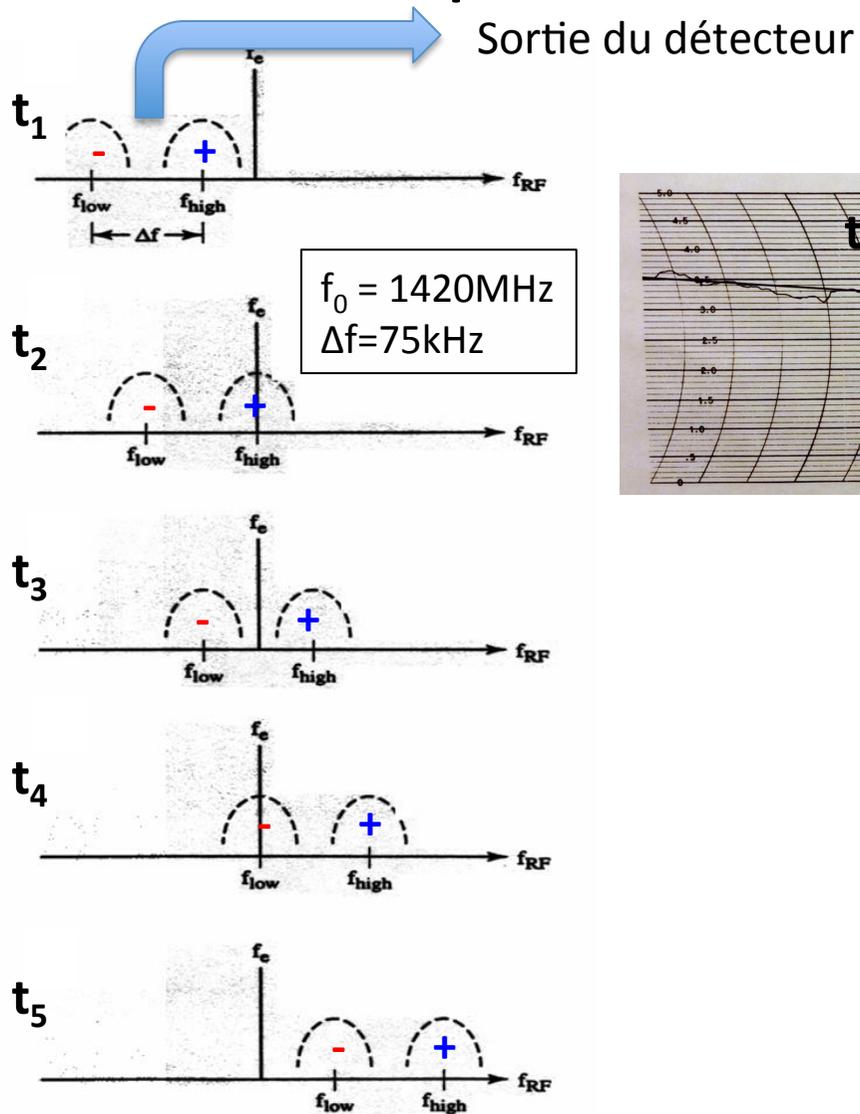
- Bruit blanc:
  - Toutes les fréquences présentes
  - Formule de Dicke valide
- Bruit basses fréquences ou en  $1/f$ :
  - Basses fréquences dominantes
  - Origine: instabilités de gain
  - Formule de Dicke non valide



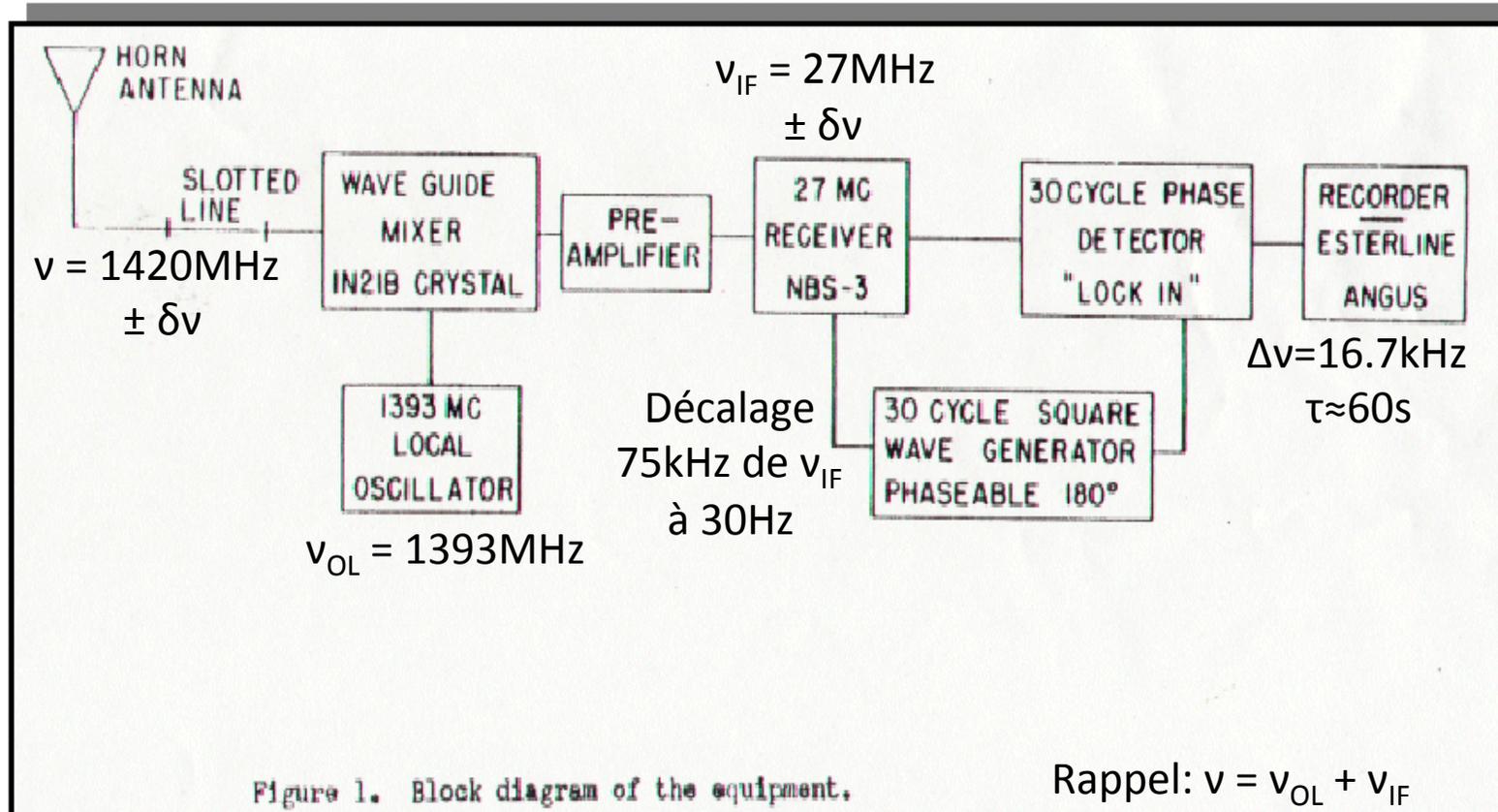
# Solution au problème du bruit basse fréquence: modulation

- Mesure différentielle suffisamment rapide par rapport au bruit en  $1/f$ 
  - On mesure:
    1. Signal + bruit
    2. Référence + bruit
    3. La sortie est:  $1 - 2 = \text{Signal} - \text{Référence}$
  - En supposant que le bruit n'a pas changé

# Switch frequency technique ou technique de décalage en fréquence



# Chaîne de détection de Ewen



# Estimation de la sensibilité

- $T_b \approx 3360\text{K}$
- Détection:
  - $\Delta\nu=16.7\text{kHz}$
  - $\tau\approx 60\text{s}$
- Sensibilité d'après la formule de Dicke:

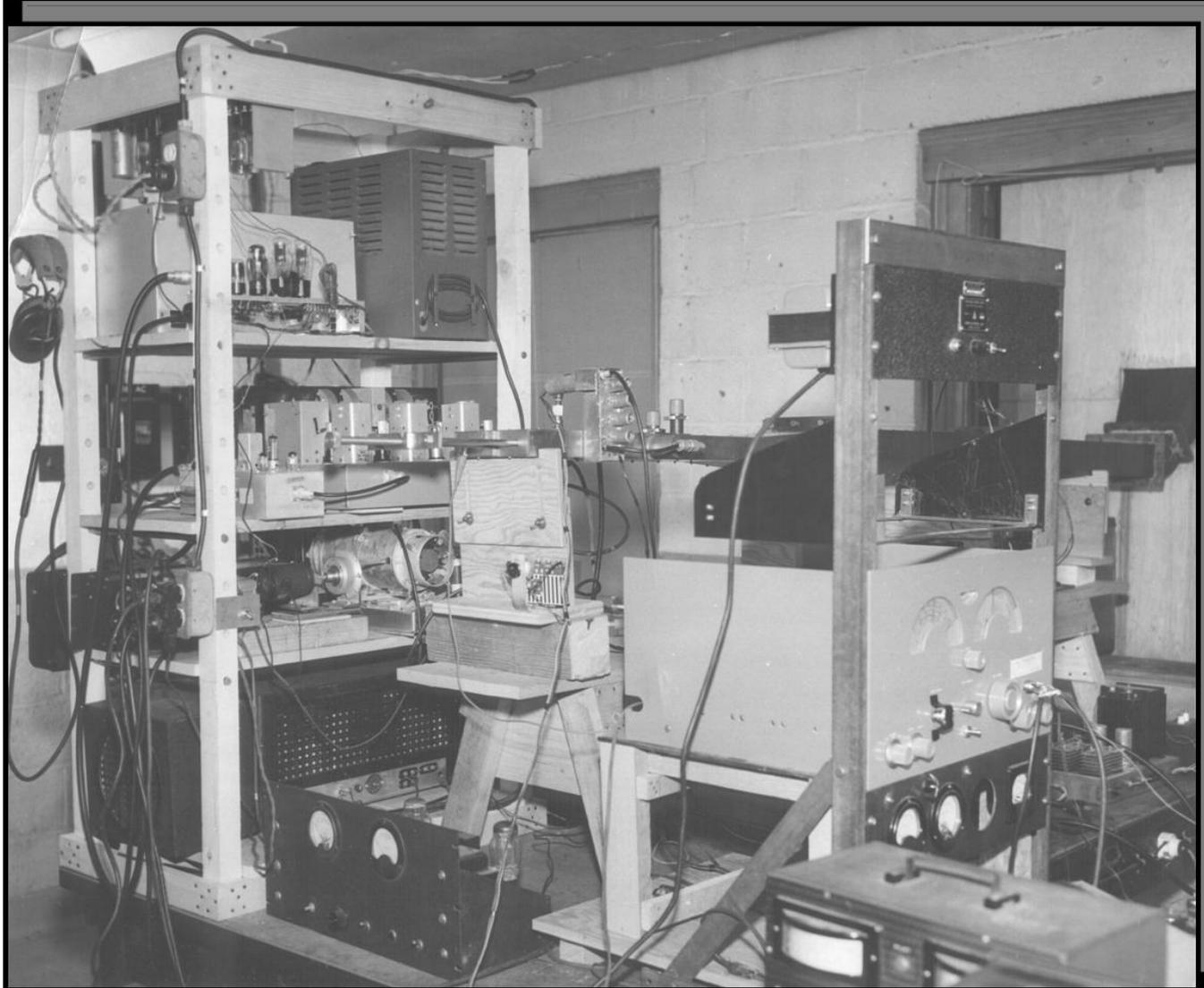
$$T_{\min} \approx 3.3\text{K}$$

the region of interest. The overall noise figure of the receiver, measured by the glow-discharge method<sup>3</sup>, is 11 db., and the mean output fluctuation at the recorder corresponds to a temperature change of 3.5°. The antenna is a pyramidal horn of about 12°

# Un peu de technologie

- Antenne, télescope
- Amplificateur Radio
- Mélangeur
- Oscillateur local
- Détecteur

# Chaîne de détection de Ewen



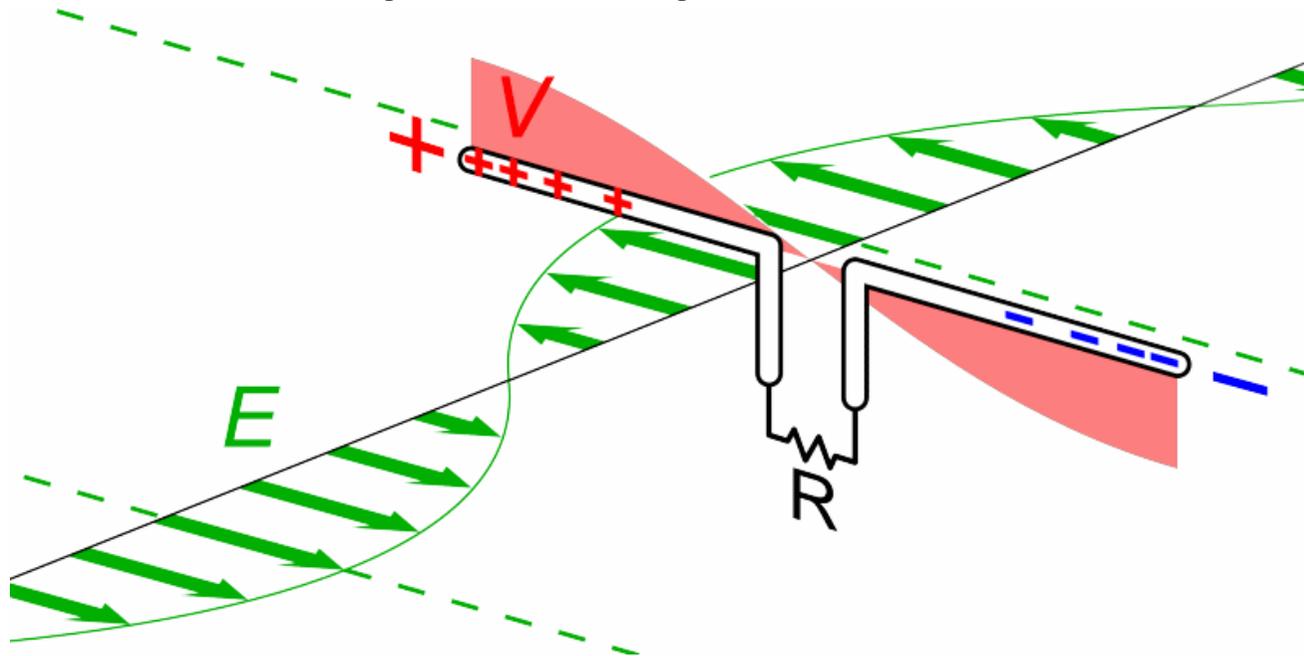
Technologie  
de l'époque:  
lampes

# Antenne

- Antenne = transformateur
  - Prélève l'onde EM en espace libre et la convertie en un mode guidé (dans un fil ou un guide d'onde)
  - Système réciproque: fonctionne en émission ou en réception avec les mêmes performances

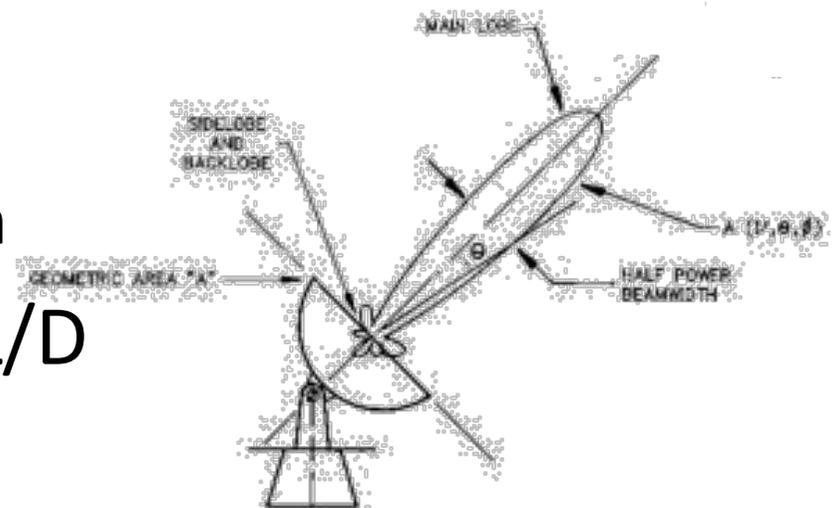
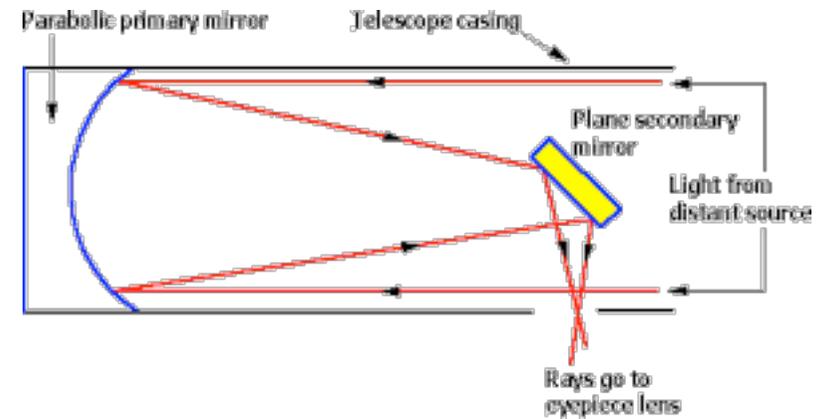


# Exemple: dipôle de Hertz



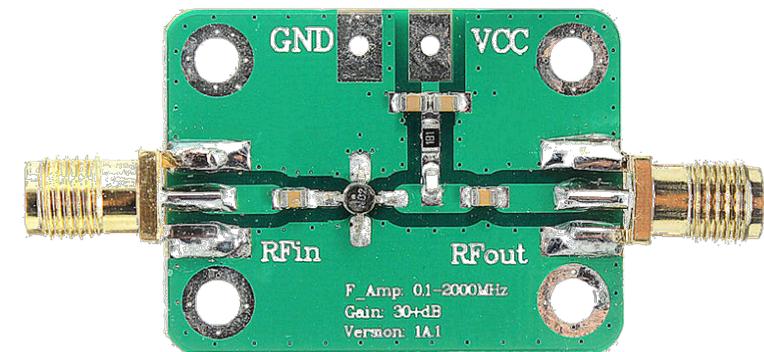
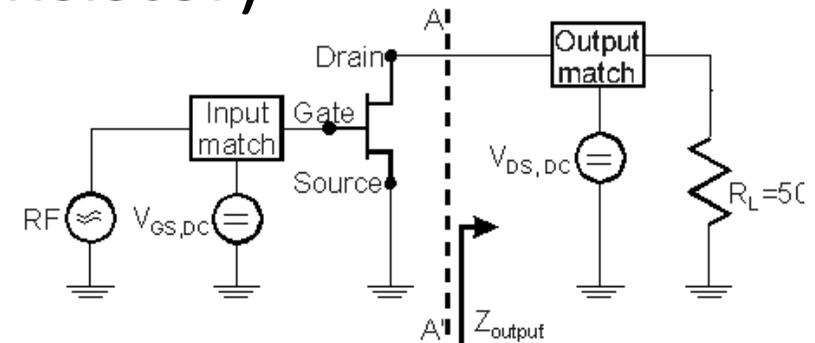
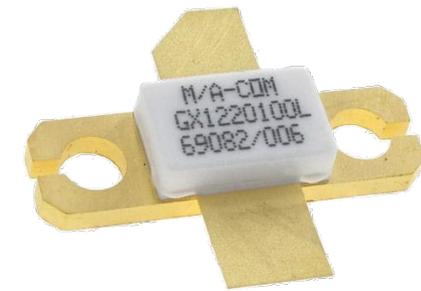
# Télescope

- Concentre l'onde EM au foyer où se trouvent une ou plusieurs antennes
  - Captent les ondes EM focalisée par le télescope
  - Vers la chaîne de détection
- Résolution angulaire:  $1.2\lambda/D$  (limite de diffraction).
  - $15^\circ$  à  $\lambda=21$  cm et  $D=1$  m



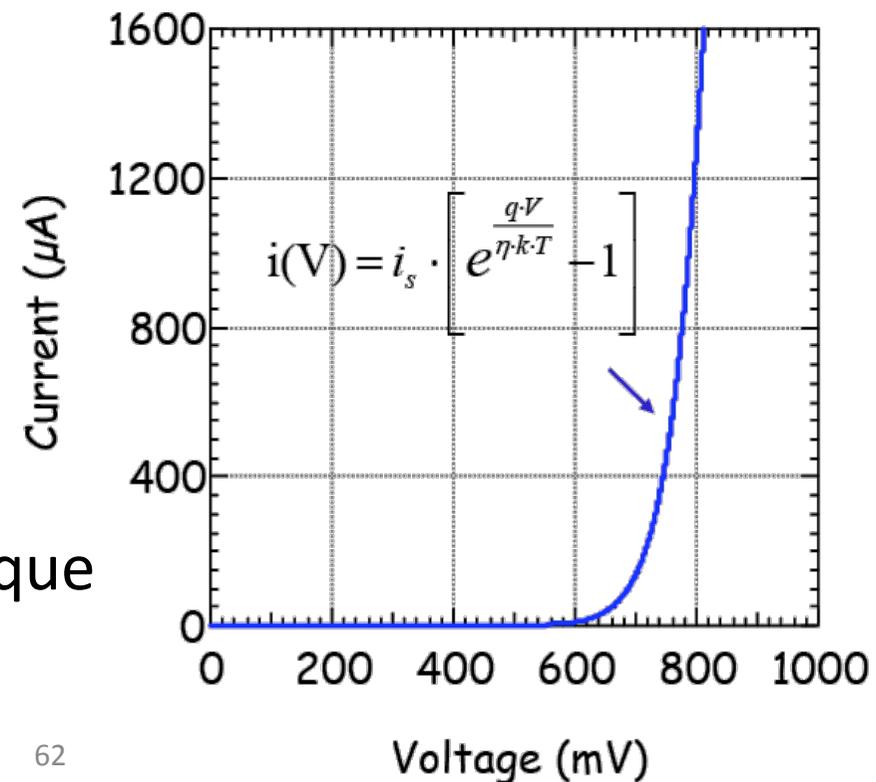
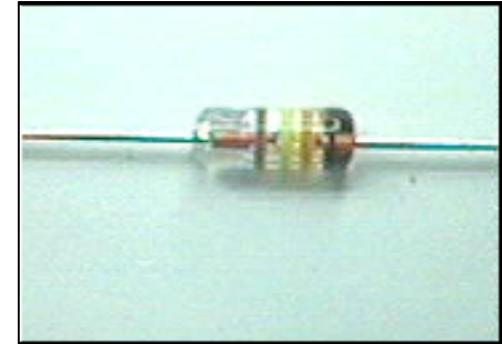
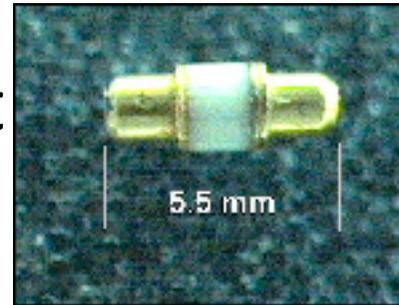
# Amplificateur

- Utilisation de transistors HEMT (High Electron Mobility Transistor)
  - Bas bruit et rapide
  - Utilisation jusqu'à 15K
- Performances:
  - $\nu < 115\text{GHz}$ ,  $\lambda > 3\text{mm}$ 
    - La limite évolue...
  - Température de bruit:  
 $\approx 5\text{-}10 \times$  la limite quantique



# Mélangeur: diodes Schottky

- Besoin d'un composant non linéaire rapide:  
**diode Schottky**
  - Contact métal-semiconducteur
  - AsGa: jusqu'à 2.5THz
- Fonctionnement à T ambiante
  - $\sim 100 \times$  la limite quantique





# Mélangeurs

- Élément non linéaire:  $I = \alpha U^2$

$$\begin{cases} \text{Signal} = E \sin(2\pi\nu_S t + \delta_S) \\ \text{OL} = V \sin(2\pi\nu_L t + \delta_L) \end{cases}$$

$$U = \text{Signal} + \text{OL}$$

Alors:

$$\begin{aligned} I &= \alpha [E \sin(2\pi\nu_S t + \delta_S) + V \sin(2\pi\nu_L t + \delta_L)]^2 \\ &= \alpha E^2 \sin^2(2\pi\nu_S t + \delta_S) + \alpha V^2 \sin^2(2\pi\nu_L t + \delta_L) \\ &\quad + 2\alpha E V \sin(2\pi\nu_S t + \delta_S) \sin(2\pi\nu_L t + \delta_L) \end{aligned}$$

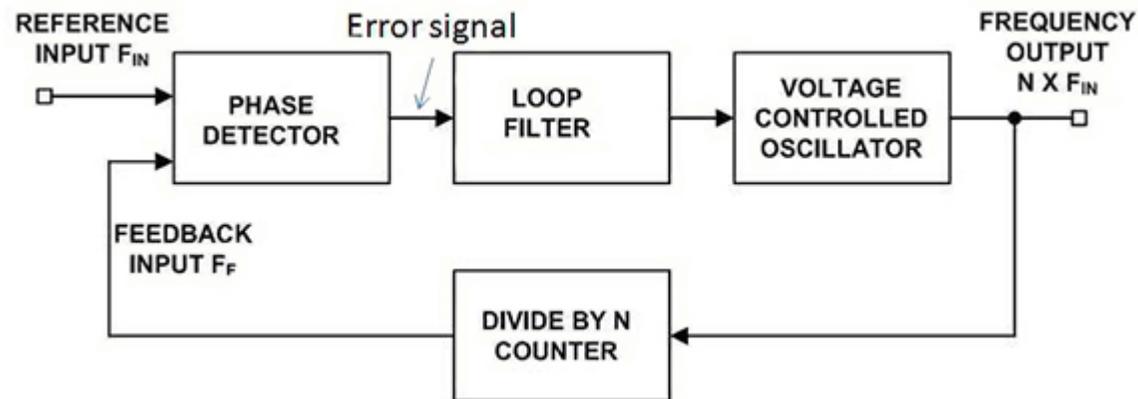
Soit:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2}\alpha (E^2 + V^2) && \text{(DC component)} \\ &\quad \cancel{\frac{1}{2}\alpha E^2 \sin(4\pi\nu_S t + 2\delta_S + \frac{\pi}{2})} && \text{(2nd harmonic of signal)} \\ &\quad \cancel{\frac{1}{2}\alpha V^2 \sin(4\pi\nu_L t + 2\delta_L + \frac{\pi}{2})} && \text{(2nd harmonic of LO)} \\ &\quad + \alpha V E \sin[2\pi(\nu_S - \nu_L)t + (\delta_S - \delta_L + \frac{\pi}{2})] && \text{(difference frequency)} \\ &\quad \cancel{\alpha V E \sin[2\pi(\nu_S + \nu_L)t + (\delta_S + \delta_L + \frac{\pi}{2})]} && \text{(sum frequency).} \end{aligned}$$

Suppression par filtrage

# Oscillateur local

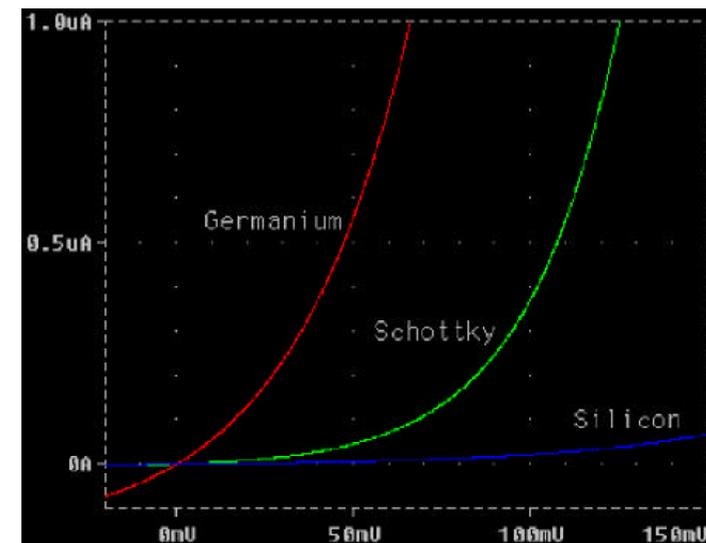
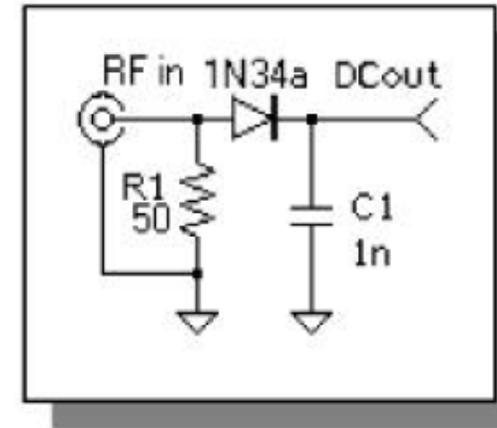
- Jusqu'à quelques GHz: oscillateur à quartz + PLL



- Au dessus: diode Gunn, klystron, carcinotron, multiplicateurs

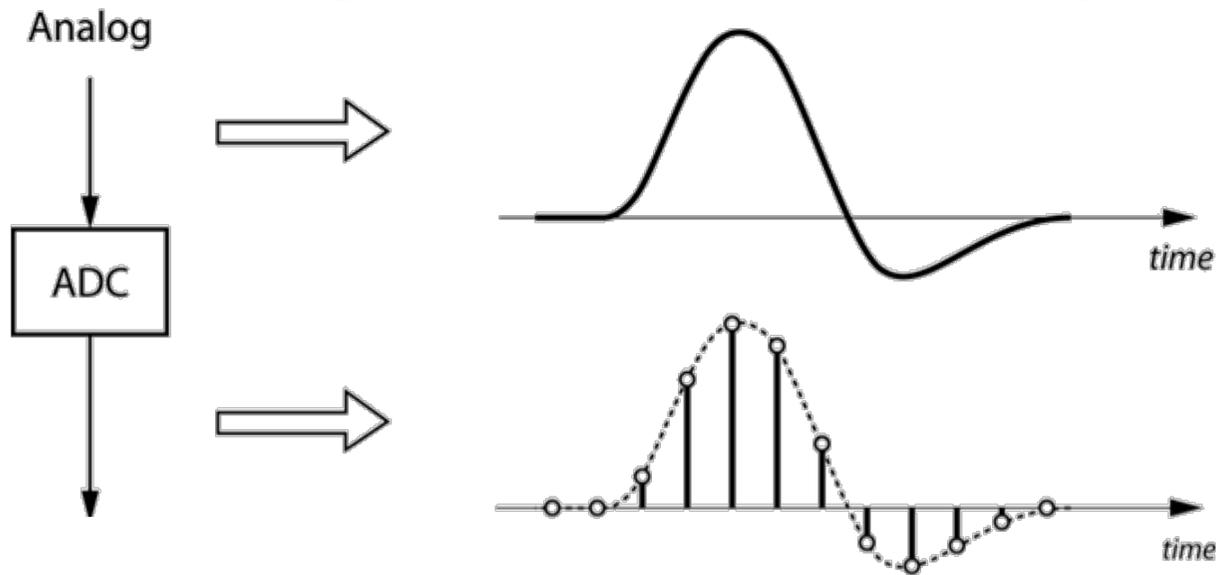
# Détecteurs quadratiques: Diodes en HF

- Utilisation d'une diode:
  - Pour de faibles puissances ( $P < 10 \mu\text{W}$ ):  
fonctionne en détecteurs quadratique  
 $V_{\text{out}} \propto V_{\text{AC}}^2 \propto P$
  - Coefficient de proportionnalité:  
dépend du type de diode,  
de la température  
⇒ Germanium ou Schottky
  - Dynamique limitée
    - $P = 1 \text{ nW} \Rightarrow 1 \mu\text{V}$  à la sortie de la diode
    - d'où le besoin amplification!



# Autre possibilité de détection: conversion analogique numérique

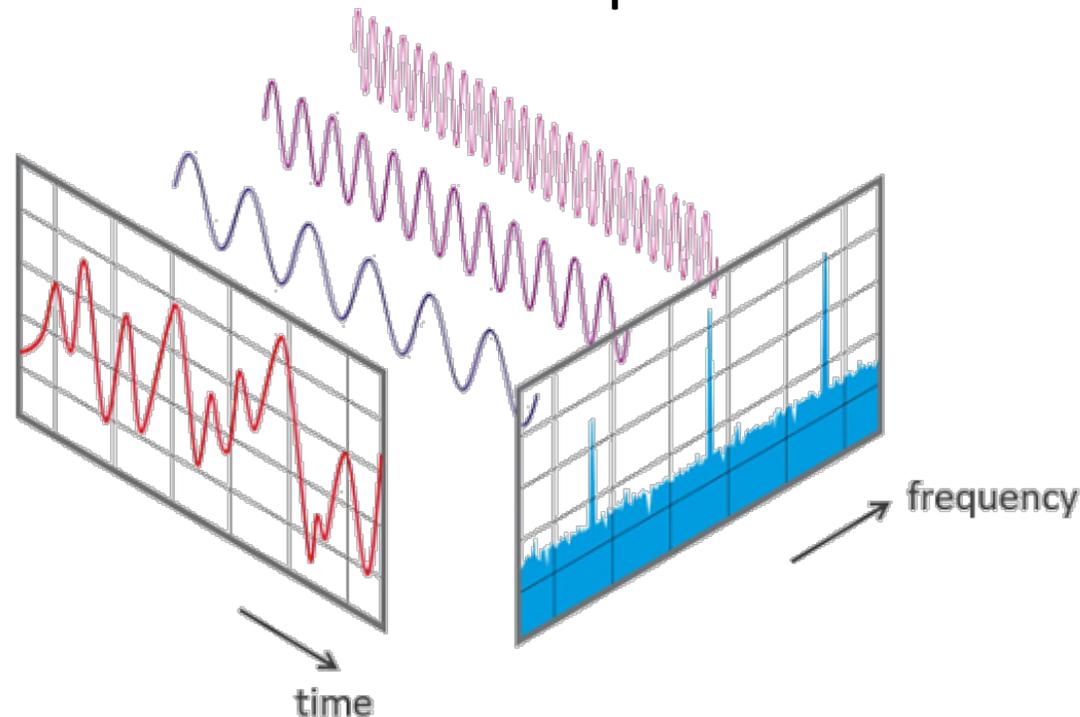
- Echantillonnage en temps et en amplitude



- Nécessaire pour le traitement numérique
  - Processeur, microcontrôleur, FPGA ou DSP

# Traitement numérique: Fast Fourier Transform (FFT)

- Algorithme permettant de trouver le contenu en fréquence d'un signal numérique
  - On obtient directement le spectre dans la bande IF



# Cet après-midi...

