



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

CHAIRE DE GALAXIES ET COSMOLOGIE  
Année académique 2019-2020  
Françoise COMBES

L'époque de la Ré-ionisation de  
l'Univers

Cours les lundis à 16h45, suivi du séminaire à 17h45  
Amphithéâtre Marguerite de Navarre

---

Observations de l'hydrogène atomique HI à 21 cm  
Extraire le signal par filtrage

Réza Ansari  
Univ. Paris-Sud & LAL/CNRS-IN2P3

- ❖ Observation du HI extragalactique à 21cm
  - ❖ Motivations
  - ❖ défis scientifiques et techniques
- ❖ Des observations aux paramètres physiques
  - ❖ Formulation du problème
  - ❖ Approche Bayésienne , Filtrage
- ❖ Extraction du signal 21 cm cosmologique à partir des observations
  - ❖ Interférométrie en mode transit et reconstruction des cartes
  - ❖ Séparation des composantes , estimation du spectre de puissance

Le signal à 21 cm extragalactique  
Les âges sombres, l'aube cosmique et l'époque de  
domination de l'énergie noire ...

---

# HI extragalactique, quels objectifs ?

---

- ❖ Formation et évolution des galaxies
- ❖ Rôle du gaz dans la formation stellaire
- ❖ Evolution des structures durant les âges sombres
- ❖ Formation des premières étoiles et galaxies
- ❖ Histoire de la réionisation
- ❖ Cosmologie : Énergie noire et matière noire

**Observer la structuration de l'univers et son évolution  
durant l'histoire cosmique**



**Inflation**  
Accelerated expansion of the Universe

**Formation of light and matter**

**Light and matter are coupled**  
Dark matter evolves independently; it starts clumping and forming a web of structures

**Light and matter separate**  
• Protons and electrons form atoms  
• Light starts travelling freely: it will become the Cosmic Microwave Background (CMB)

**Dark ages**  
Atoms start feeling the gravity of the cosmic web of dark matter

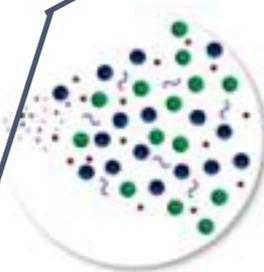
**First stars**  
The first stars and galaxies form in the densest knots of the cosmic web

**Galaxy evolution**

**The present Universe**



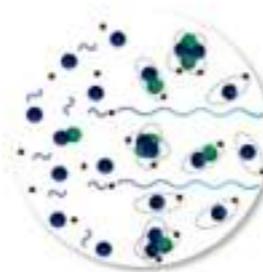
• Tiny fluctuations: the seeds of future structures  
• Gravitational waves?



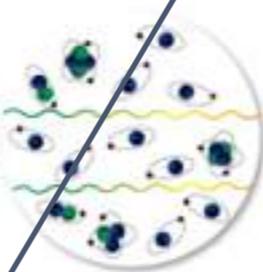
Frequent collisions between normal matter and light



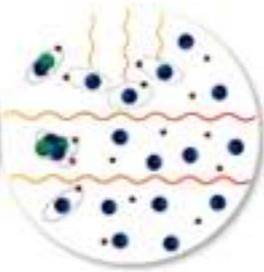
As the Universe expands, particles collide less frequently



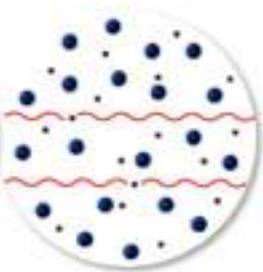
Last scattering of light off electrons  
→ Polarisation



The Universe is dark as stars and galaxies are yet to form



Light from first stars and galaxies breaks atoms apart and "reionises" the Universe



Light can interact again with electrons  
→ Polarisation

Aujourd'hui

**Ages sombres**

**Premières étoiles/ galaxies ...**

**Quasars ...**

**Energie Noire**  
Accélération de l'expansion

$n_b$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	330	0.25	0.03	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$
Age (MY)	0.38	15	50	500	1200	13800
T (K)	3000	300	150	30	15	2.725
Z	1100	100	50	10	5	0

# Le modèle cosmologique $\Lambda$ CDM et ses 6 paramètres (Planck+)

3 parameters to set (though General Relativity) the dynamics of the Universe,  
 1 parameter to capture the effect of reionisation (end of the dark ages),  
 2 parameters to describe the characteristics of primordial fluctuations.  
 Flat spatial geometry assumed.

$\Omega_b h^2$  Baryon density today - The amount of ordinary matter  
 $\Omega_c h^2$  Cold dark matter density today - only weakly interacting  
 $\Theta$  Sound horizon size when optical depth  $\tau$  reaches unity  
 (Distance traveled by a sound wave since inflation, when universe became transparent at recombination at  $t \sim 380\,000$  years)

$\tau$  Optical depth at reionisation (due to Thomson scattering of photons on  $e^-$ ),  
 fraction of the CMB photons re-scattered during that process

$A_s$  Amplitude of the curvature power spectrum  
 (Overall contrast of primordial fluctuations)

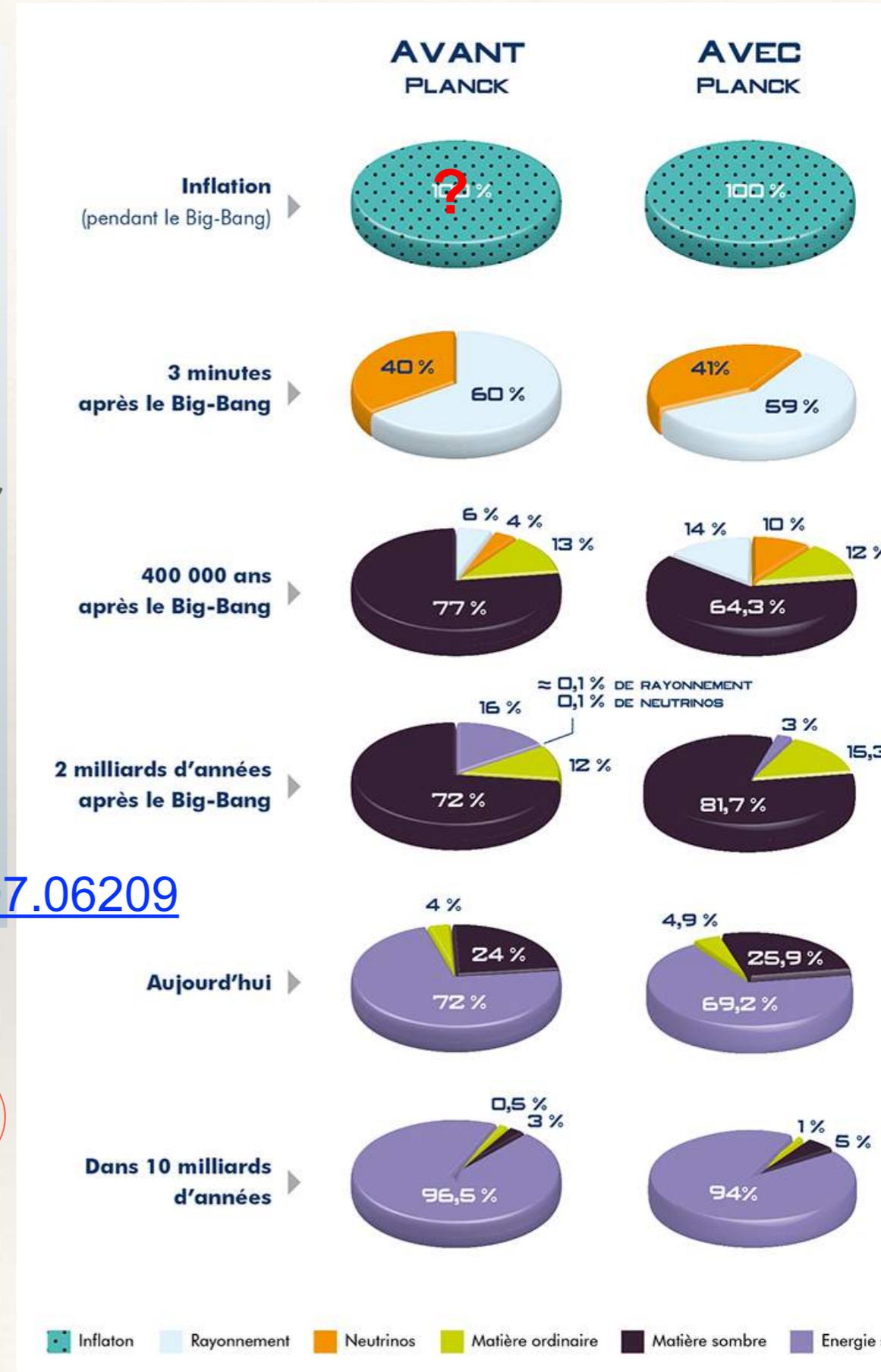
$n_s$  Scalar power spectrum power law index  
 ( $n_s - 1$  measures departure from scale invariance)

Others are *derived* parameters within the model, in particular

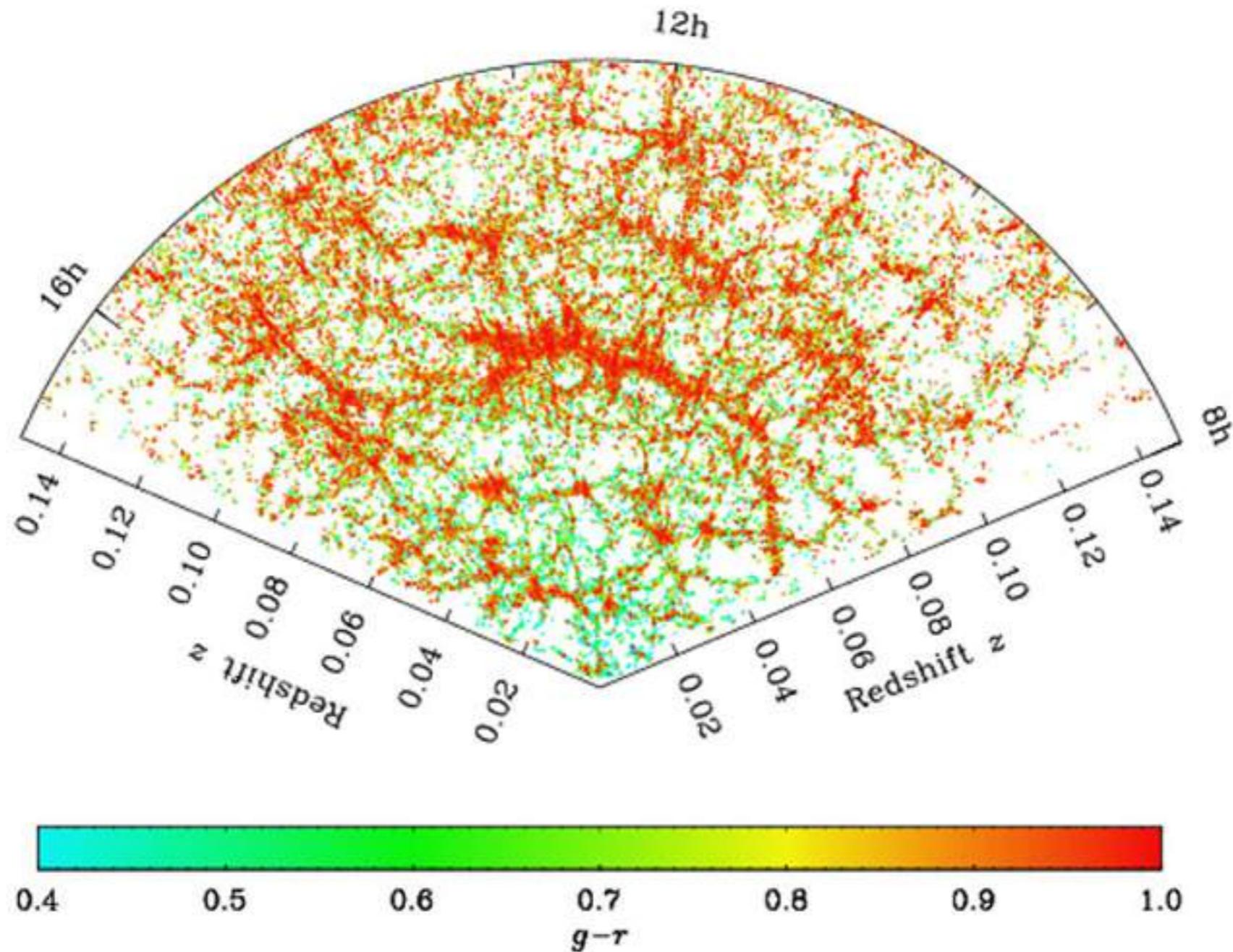
- $\Omega$  "Dark Energy" fraction of the critical density (derived only if assumed flat)
- $H_0$  the expansion rate today (in km/s per Mpc of separation)
- $t_0$  the age of the universe (in Gy)

[Planck 2018, arXiv:1807.06209](https://arxiv.org/abs/1807.06209)

La nature de la matière noire (5 fois plus abondante que la matière ordinaire) et celle de l'énergie noire (ou  $\Lambda$ , constante cosmologique) responsable de l'accélération de l'expansion cosmique, sont parmi les grands énigmes de la physique aujourd'hui



L'univers est (quasi) homogène et isotrope à grand échelle ( $>Gpc$ ), mais structuré à plus petites échelles, des quelques centaines de Mpc (BAO  $\sim 100$  Mpc), puis les amas de galaxies (1-10 Mpc), jusqu'aux galaxies (10-100 kpc) et puis les étoiles. Les structures se forment essentiellement sous l'effet de la gravitation effondrement gravitationnel



Relevé SDSS, cartes des galaxies:

[Zehavi et al. ApJ 2011, arXiv:1005.2413](#)

---

# L'émission à 21 cm des galaxies

---

- ❖ A bas redshift ( $z < \sim 6$ ), l'essentiel de l'hydrogène atomique se trouve dans les galaxies (réionisation du milieu intergalactique)
- ❖ Transition hyperfine (spin-orbite) de hydrogène atomique :
  - ❖  $\nu \approx 1,420405 \text{ GHz} \rightarrow \lambda \approx 21 \text{ cm}$
- ❖ Gaz:  $\sim 0.1 \dots 0.5 \times$  masse dynamique, masse HI  $\sim 0.3 \dots 0.7 \times M_{\text{gaz}}$
- ❖ Puissance émise  $\approx 3 \cdot 10^{18} \text{ W} \times (M_{\text{HI}}/M_{\text{sol}})$  (for  $\Delta\nu \sim 10^6 \text{ Hz}$ ) - à comparer à la luminosité solaire  $L_{\text{sol}} \approx 3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- ❖ Densité des galaxies  $\approx 0.05 \text{ Gal} / \text{Mpc}^3$  avec  $M_{\text{HI}} > 10^9 M_{\text{sol}}$ ,  
 $\approx 0.01 \text{ Gal} / \text{Mpc}^3$  avec  $M_{\text{HI}} > 10^{10}$

---

# Une galaxie à $z=0.3$ , $D_L = 1500$ Mpc

---

## ❖ Emission Radio à 21 cm

- ❖  $10^9 M_{\text{sol}}$  de HI  $\rightarrow 3 \cdot 10^{27}$  watts (puissance émise)
- ❖ Puissance reçue:  $< 10^{-24} \text{ W/m}^2$  répartie sur  $\Delta\nu \sim 1$  MHz (qqes photons /  $\text{m}^2$  /s)
- ❖ ce qui correspond à moins de  $10^{-30} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$  ,  $< 10^{-4}$  Jy (100  $\mu$  Jy)

## ❖ En optique

- ❖  $10^9 - 10^{10} L_{\text{sol}}$   $\rightarrow \sim 10^{35}$  watts (puissance émise)
- ❖ Puissance reçue:  $< 10^{-16} \text{ W/m}^2$  ,  $\sim 10^{-17} \text{ W/m}^2$  dans une bande photométrique ( $\sim 10$  photons /  $\text{m}^2$  /s)
- ❖ Densité des galaxies  $\approx 0.05 \text{ Gal} / \text{Mpc}^3$  with  $M_{\text{HI}} > 10^9 M_{\text{sol}} \approx 0.01 \text{ Gal} / \text{Mpc}^3$  with  $M_{\text{HI}} > 10^{10}$

# Observer les galaxies à 21cm à des distances cosmologiques

$$S_{21}^{Jy} \simeq 0.021 \cdot 10^{-6} \text{ Jy} \frac{M_{HI}}{M_{\odot}} \times \left( \frac{1 \text{ Mpc}}{D_L} \right)^2 \times \frac{200 \text{ km/s}}{\sigma_v} (1+z)$$

$$S_{lim} = \frac{2 k T_{sys}}{A \sqrt{2 t_{integ} \Delta \nu}}$$

Jansky :  $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/Hz/m}^2$

$S_{lim}$  en  $\mu\text{Jy}$  pour  
 $t_{integ} = 86400 \text{ s}$  ,  $\Delta \nu = 1 \text{ MHz}$

$S_{21}$  en  $\mu\text{Jy}$  pour  $M_{HI} = 10^{10} M_{\odot}$

A (m <sup>2</sup> )	Tsys (K)	Slim
5000	50	66
5000	25	33
100000	50	3,5
100000	25	1,7

z	S21 ( $\mu\text{Jy}$ )
0,25	175
0,5	40
1	9,6
1,5	3,5
2	2,5

> 100 000 m<sup>2</sup> → SKA !



Grand radio-télescope  
(single dish)  
Résolution angulaire  
déterminée par la taille  
du réflecteur (~300 m  
pour Arecibo, Puerto-  
Rico, USA)

Interférométrie :  
mesure de la phase et de  
l'amplitude des ondes  
radio incidentes.  
Combinaison des  
signaux électriques  
provenant des  
différentes antennes  
(VLA aux Etats-Unis sur  
l'image)



Résolution 3-20 arcmin

Sensibilité ~ mJy

Table B.1 Comparison of major blind HI surveys

Survey	Area	Beam	$V_{\max}$	$V_{\text{res}}^a$	$t_s$	rms <sup>b</sup>	$N_{\text{det}}$	min $M_{\text{HI}}^c$	Ref
	(deg <sup>2</sup> )	(arcmin)	(km/s)	(km/s)	(s)	(mJy)		( $M_{\text{sun}}$ )	
AHISS	65	3.3	-700 - 7400	16	var	0.7	65	$1.9 \times 10^6$	1
ADBS	430	3.3	-650 - 7980	34	12	3.6	265	$9.9 \times 10^6$	2
WSRT	1800	49.	-1000 - 6500	17	60	18	155	$4.9 \times 10^7$	3
Nancay CVn	800	4 x 20	-350 - 2350	10	80	7.5	33	$2.0 \times 10^7$	4
HJASS	1115	12.	-1000 - 10000 <sup>d</sup>	18	400	13	222	$3.6 \times 10^7$	5
HJASS-VIR	32	12.	500 - 2500	18	3500	4.	31	$1.1 \times 10^7$	6
HIDEEP	60	15.5	-1280 - 12700	18	9000	3.2	173	$8.8 \times 10^6$	7
HIZSS	1840	15.5	-1280 - 12700	27	200	15.	110	$4.1 \times 10^7$	8
HICAT	21341	15.5	300 - 12700	18	450	13.	4315	$3.6 \times 10^7$	9
HIPASS		15.5	300 - 12700	18	450	13.	(6000)	$3.6 \times 10^7$	10
AUDS	0.4	3.5	-960 - 47000 <sup>e</sup>	TBD	70 x 3600	0.02	(40)	$0.6 \times 10^6$	11
AGES	TBD	3.5	-960 - 47000 <sup>e</sup>	TBD	300	0.5	TBD	$1.4 \times 10^6$	12
ALFALFA	7000	3.5	-2000 - 18000	11	28	1.6	(16000)	$4.4 \times 10^6$	

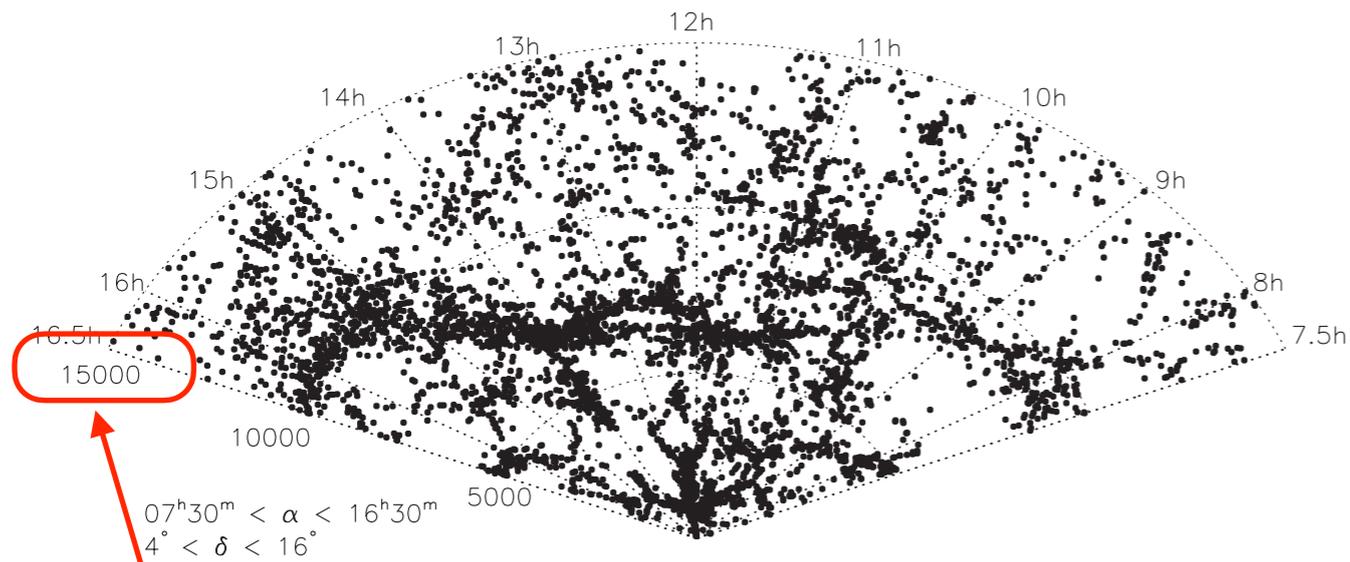
Voir : <http://egg.astro.cornell.edu/index.php>

$z_{\max} \sim 0.03 \dots 0.15$

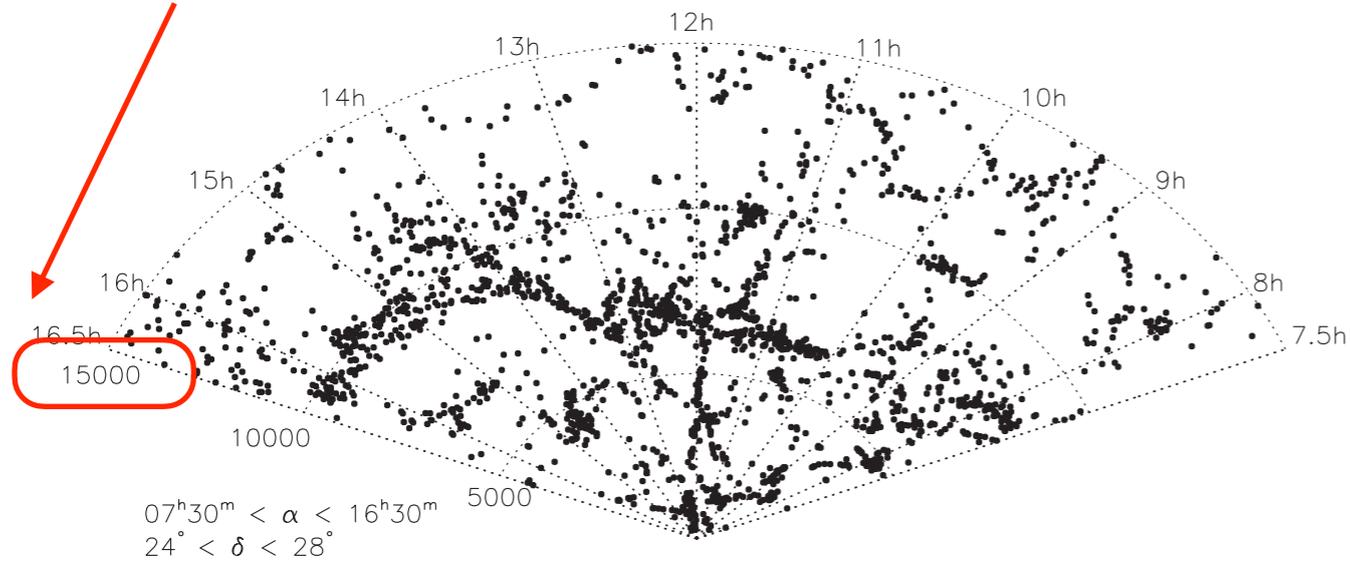
$\delta z \sim 0.0001$

Comparaison de quelques relevés à 21 cm

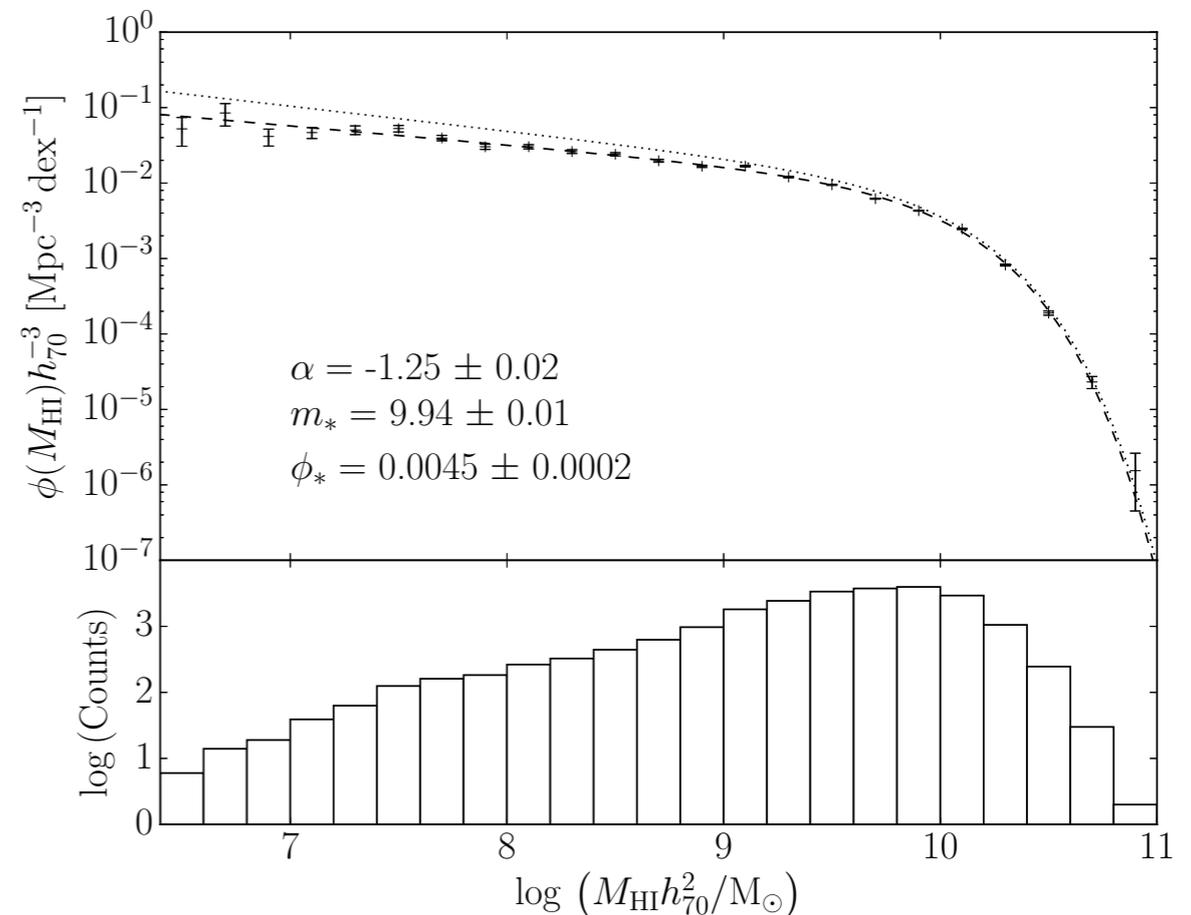
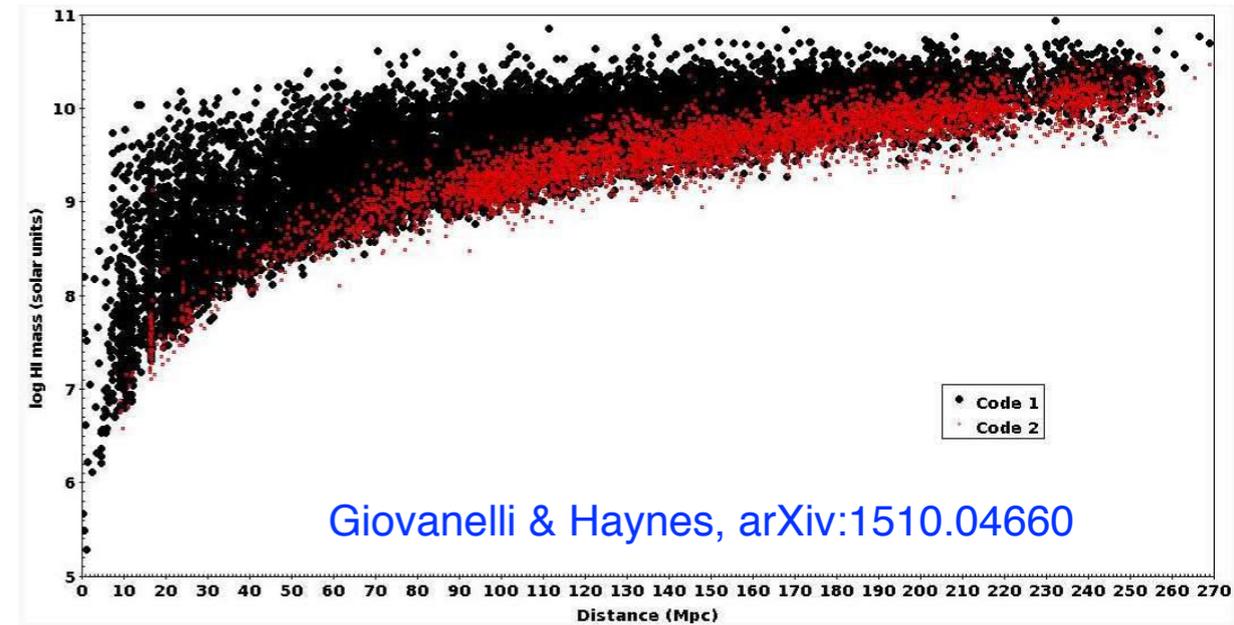
# Arecibo ALFALFA blind H<sub>I</sub> survey



15000 km/s  $\rightarrow$   $z \sim 0.05$



ALFALFA, Martin et al, ApJ 2010



ALFALFA, Jones et al, arXiv:1802.00053

# Observations à 21 cm comparées à l'optique

- ❖ Possibilité d'observations spectro-photométrique à 21 cm - **seule signature spectrale en bande L (~GHz)**
- ❖ Bande: ~ 100 MHz ... 1500 MHz -  $\nu = f(z)$ ,  $z: 0 \dots 10$   
1420 MHz @  $z=0$ , 946 MHz @  $z=0.5$ , 720 @  $z=1$ , 284 @  $z=5$ , 129 @  $z=10$
- ❖ La résolution des instruments radio limitée par la diffraction:  
700 MHz:  $D=100$  m  $\rightarrow$   $\sim 20'$ ,  $D=1$ km  $\rightarrow$   $\sim 2'$ ,  $D=100$  km  $\rightarrow$   $\sim 1''$  [ $2' \rightarrow 1$  Mpc @  $z = 1$ ]
- ❖ Mesure d'intensité en optique, amplitude & phase en radio
- ❖  $\rightarrow$  Interférométrie et spectroscopie en radio
- ❖ Bruit instrumental (détecteur / électronique) souvent négligeable en optique ( $R_{\text{Onoise}} < 5$  e), mais dominant en radio ( $T_{\text{sys}} \sim 20-100$  K)
- ❖ Pollution lumineuse, et diffusion atmosphérique en optique  
Interférence électromagnétique (RFI), ionosphere (à basse fréquences) en radio

# Cartographie 3D à 21 cm : $T_{21}(\alpha, \delta, z)$

- 📍 Cartographie 3D mapping de la distribution de l'hydrogène atomique et son évolution avec le redshift: mesure de la carte d'émission à 21 cm, sans détection des sources *ponctuelles*
- 📍 Instrument avec un grand champ de vue instantané et une grande largeur de bande, pour observer de grands volumes d'univers
- 📍 **Interférométrie numérique**
  - 📍 Implique de traiter au vol de très grand flot de données, plusieurs *TeraOctets/seconde*
  - 📍 Ou Grand réflecteurs équipés de récepteurs multi-lobes
- ≡ **Bruit instrumental (électronique) (  $T_{sys}$  )**
- ≡ **Avant-plans: Emissions diffuses (Galactique) et sources radio → séparation des composantes**
- ≡ **Calibration, instrument stability, RFI ...**

Furlanetto et al. Phys.Rep 2006, arXiv:0608032

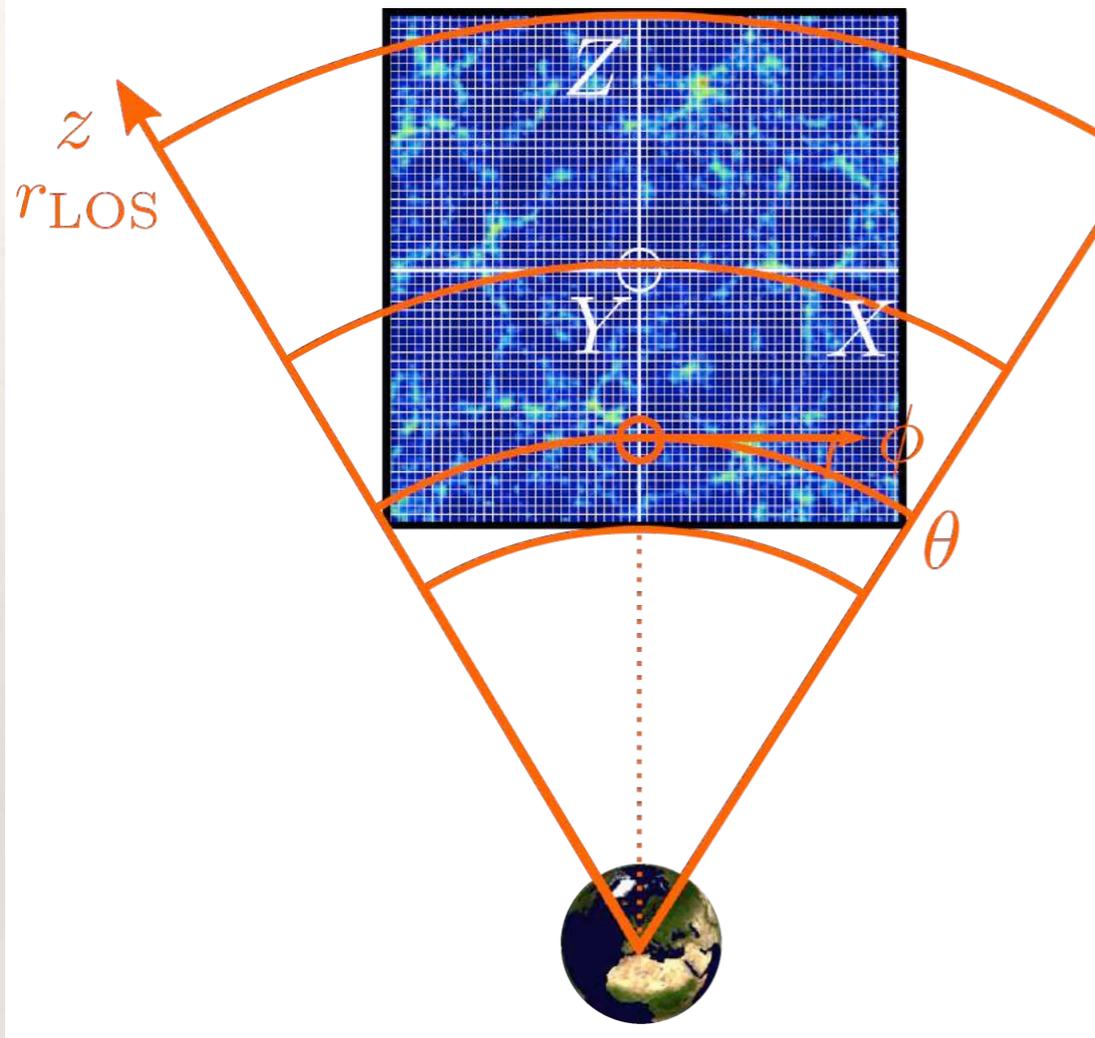
Wyithe et al. MNRAS 2008, arXiv:0709.2955

Chang et al. PRL 2008, arXiv:0709.3672

Ansari et al. A&A 2012, arXiv:0709.3672

# Observations à 21 cm

- redshift  $\leftrightarrow$  fréquence
- Position angulaire obtenue par imagerie



## Single Dish

- Cartographie du ciel en mode drift-scan or ou en balayant le ciel : on obtient des cartes du ciel

## Interféromètres

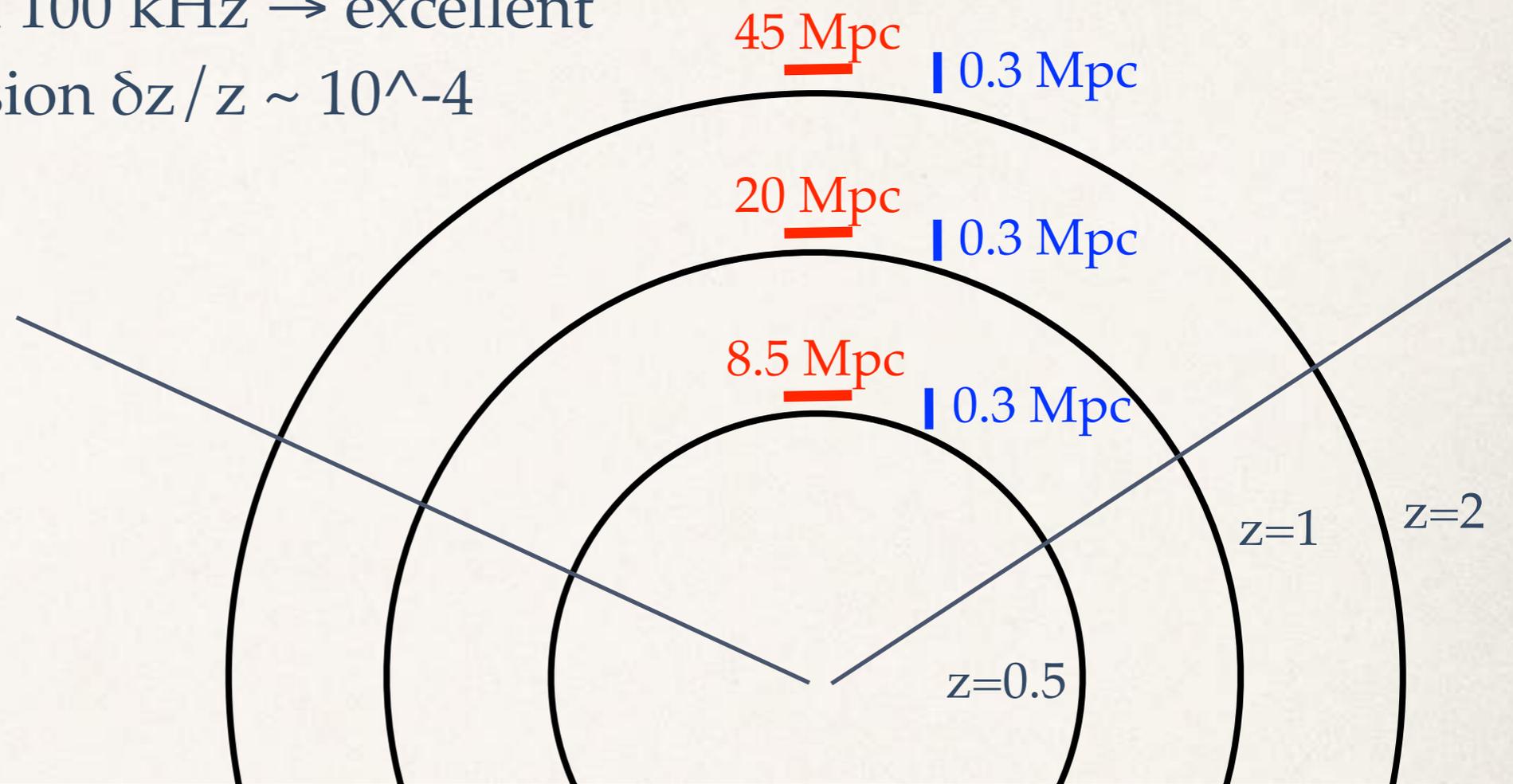
- On obtient des visibilités (signaux de corrélations) à partir desquels il faut reconstruire les cartes du ciel
- La décomposition en modes  $m$  dans le cas d'observation en drift-scan Est-Ouest complète
- Les visibilités correspondent aux modes de Fourier transverse  $k_{\perp}$

## Extraction du signal:

- Calcul de spectres de puissance  $P(k)$  ou  $C(l, z_1, z_2)$  à partir des cartes du ciel sky maps
- Projection sur des bases (modes) appropriées afin de soustraire les avant-plans

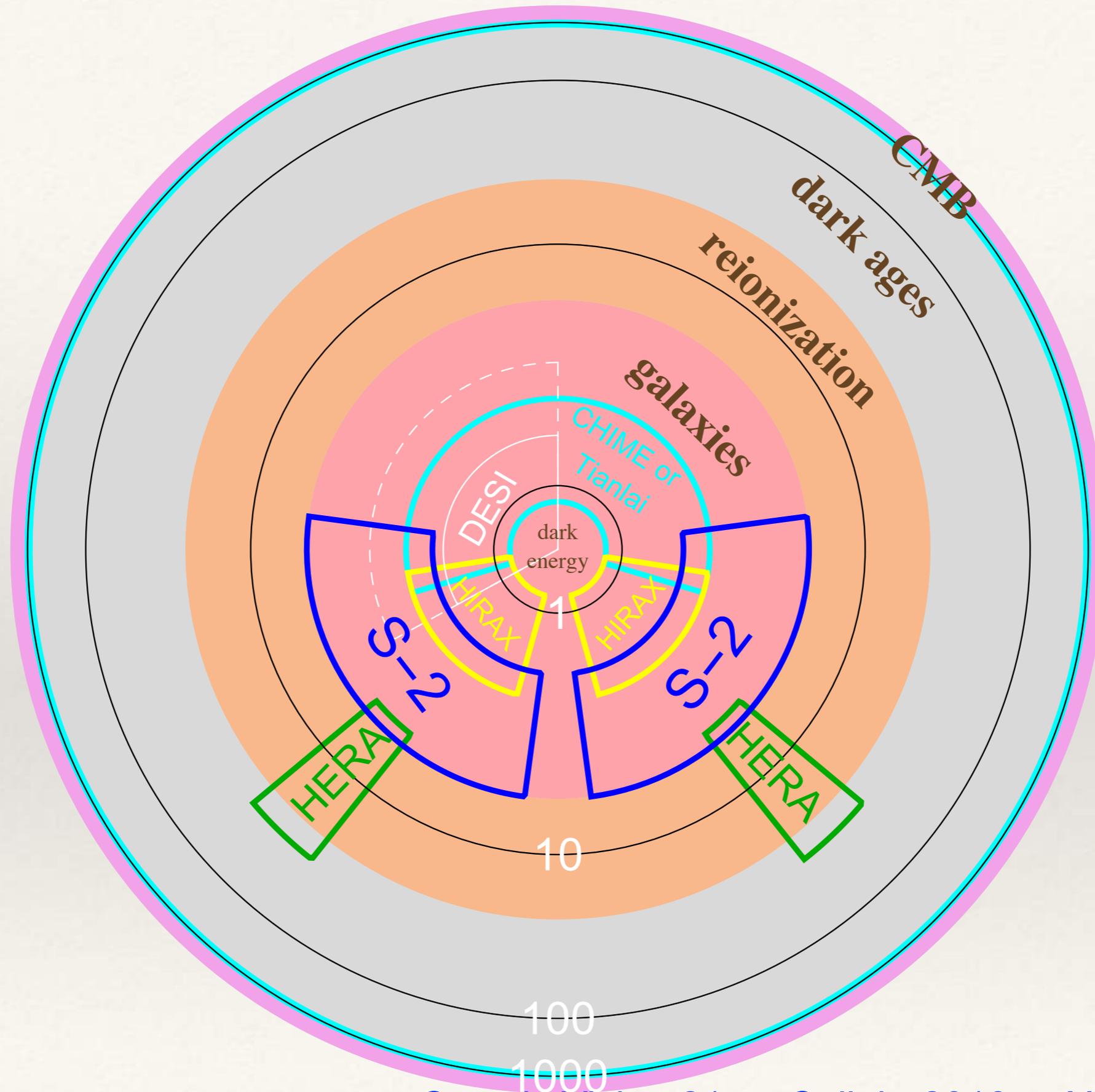
$L=100$  m array  $\rightarrow$  ang. resolution  $\delta\theta \sim \lambda/L$ ,  
deteriorating with redshift  $z$

spectral resolution 100 kHz  $\rightarrow$  excellent  
redshift precision  $\delta z/z \sim 10^{-4}$



$z$	$\delta\theta$	$d_{\text{LOS}}$ (Mpc)	$H$	$\delta d_{\perp}$ (Mpc)	$\delta d_{\parallel}$ (Mpc)
0,5	15'	1945	90	8,5	$\sim 0.3$
1	20'	3400	120	20	$\sim 0.3$
2	30'	5320	200	45	$\sim 0.3$
3	40'	6320	300	75	$\sim 0.3$

# Univers potentiellement accessible à 21 cm



~100 m



RAID  
Radio Array of Inexpensive  
Dishes

RAID

2011

Sep

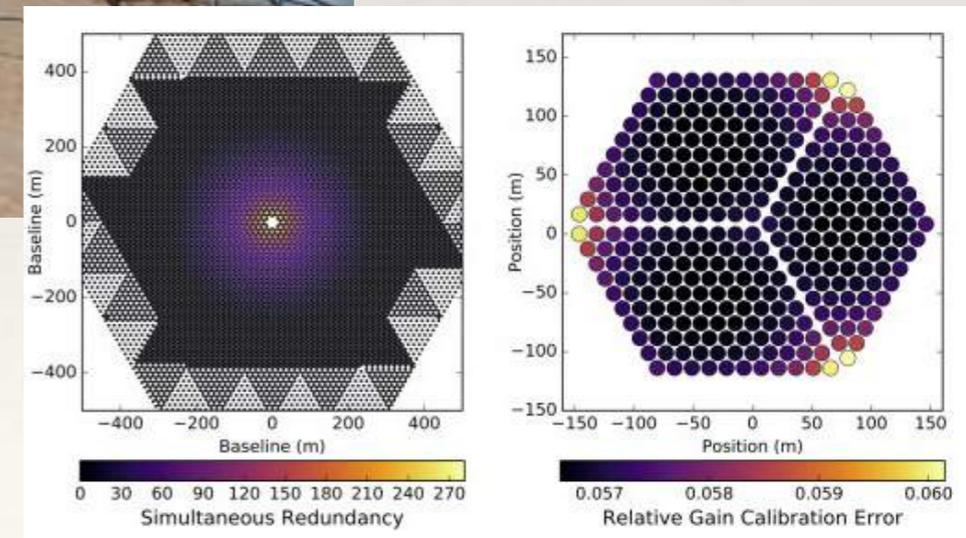
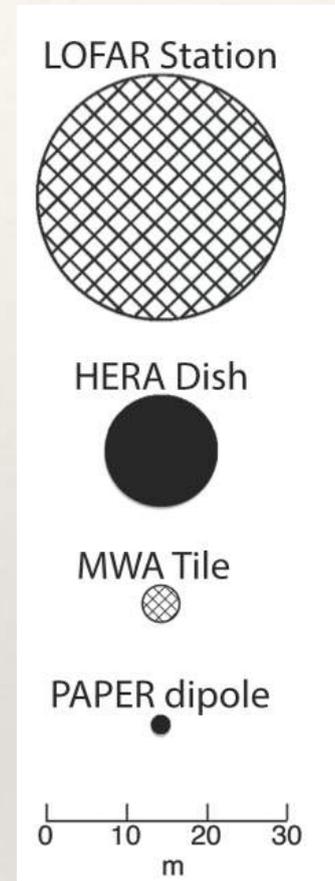
R. Ansari, TauP conference, Munich, Sep 2011

21cm intensity mapping dark energy survey instrument  
concept - Dense interferometric array  
8-12 cylindrical reflectors (CRT)

OR

100-400 parabolic 5-6 meter diameter dishes (**RAID**)  
200-1000 receiver elements - Data flow : 0.1 - 1 TBytes/s

# HERA : Hydrogen Epoch of Reionisation Array

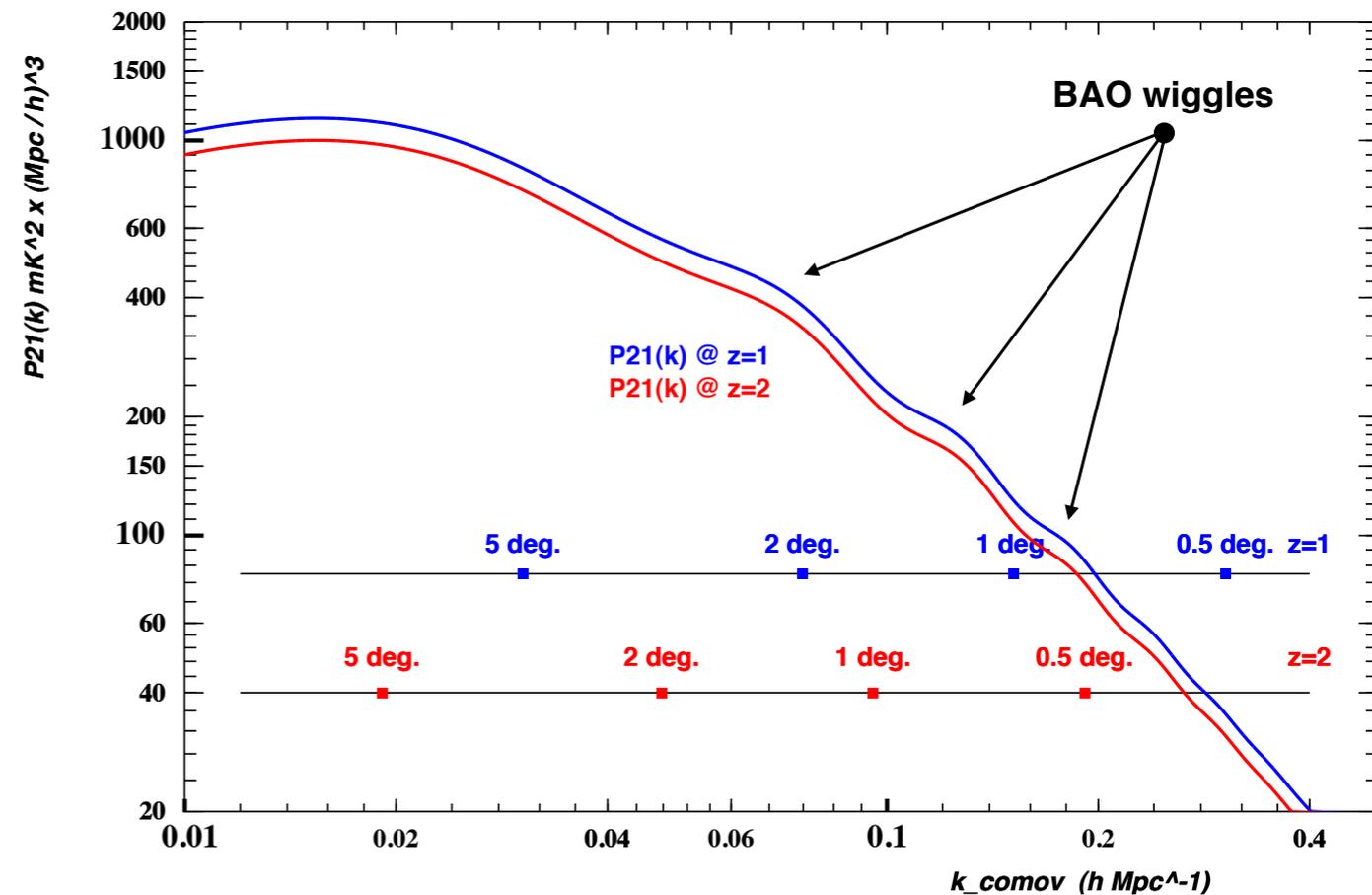
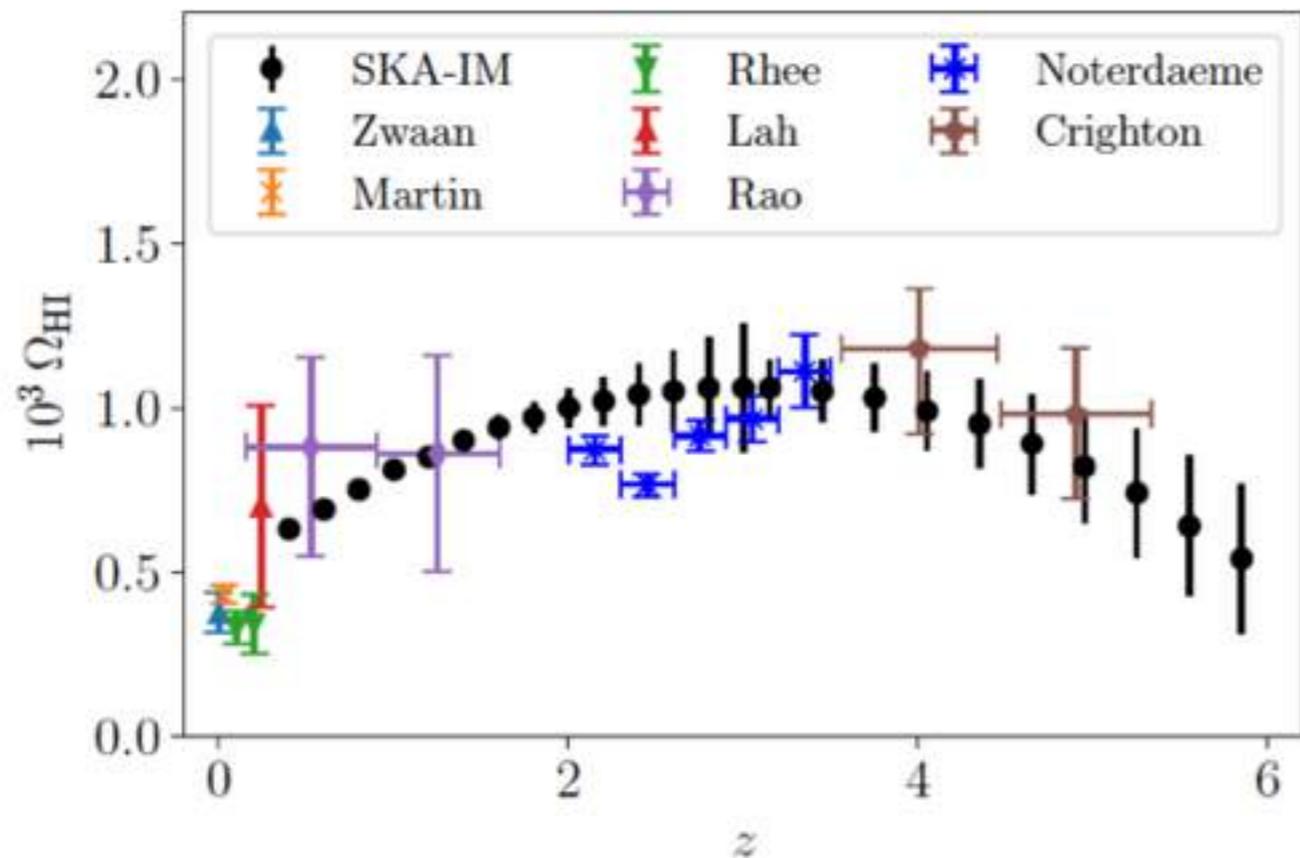


Pober et al. ApJ 2014, arXiv:1310.7031

# Intensité du signal H<sub>I</sub> à 21 cm

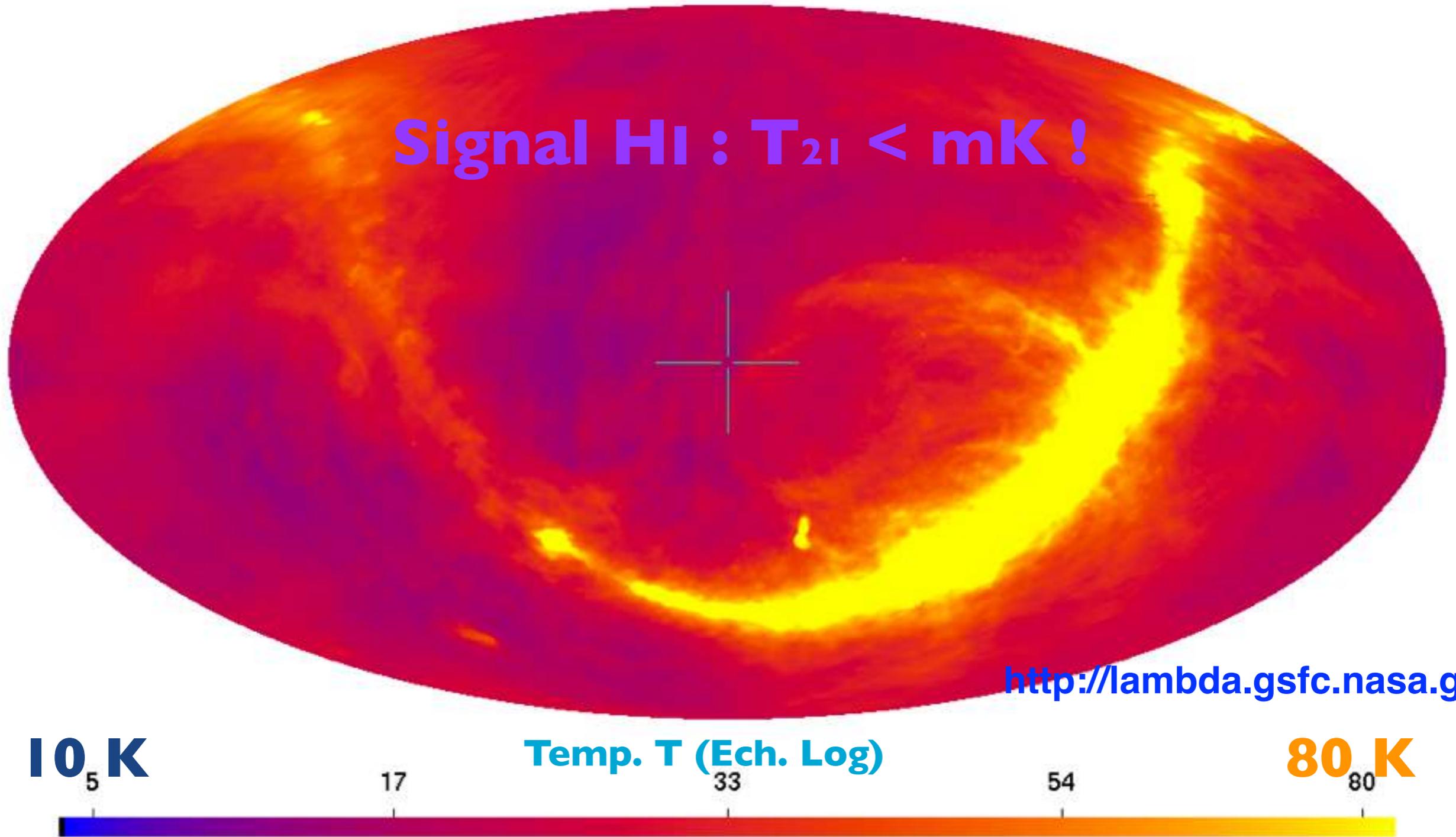
$$P_{21}(k) \sim (\bar{T}_{21})^2 \times P_{LSS}(k)$$

$$\bar{T}_{21} \simeq 4.7 \text{ mK} \frac{\Omega_{H_I}}{10^{-3}} \frac{H_0(1+z)^2}{H(z)}$$



# Les avant-plans

**Signal HI :  $T_{21} < \text{mK}$  !**



Carte Haslam à 408 MHz (synchrotron Galactic)

La température de brillance, en loi de puissance:  $\nu^{-\beta}$  ( $\beta \sim 2.5$ )

400 MHz ( $z \sim 2.5$ )  $\rightarrow$  710 MHz ( $z \sim 1$ )  $\rightarrow$  950 MHz ( $z \sim 0.5$ )

$T_{\text{sync}}$ : 10 K  $\rightarrow$   $\sim 4$  K  $\rightarrow$   $\sim 1.5$  K

# Des observations aux paramètres physiques

---

# Etant donné un ensemble d'observations

---

- ❖ Quand se sont formées les premières étoiles ?
- ❖ Quel a été le spectre d'émission de ces étoiles ou objets lumineux ?
- ❖ Sur quelle période et comment s'est déroulée la réionisation ?
- ❖ Le spectre du fond de rayonnement cosmique a-t-il été modifié durant les âges sombres, à travers l'interaction avec la matière noire ?
- ❖ Quelle est l'histoire de l'expansion de l'univers ?
- ❖ L'effet de l'énergie noire sur l'évolution de l'univers et la formation des structures se distingue-t-il de l'effet d'une constante cosmologique  $\Lambda$  ?
- ❖ ...

---

# Formulation du problème

---

- ❖ Soit un ensemble d'observations  $D=\{d_i\}$  , une hypothèse ou modèle  $H$  et éventuellement ses paramètres  $w$
- ❖ Il y a un lien probabiliste entre les observations et le modèle, soit de manière intrinsèque, soit à travers les imperfections des observations (erreurs de mesure)

$$\begin{array}{ccc} P(D|\mathcal{H}_a) & P(D|\mathcal{H}_b) & \\ & & \\ & P(D|\mathcal{H}, w) & \longrightarrow \\ & & \frac{P(\mathcal{H}_a|D)}{P(\mathcal{H}_b|D)} \\ & & P(w|D, \mathcal{H}) \end{array}$$

---

# Approche Bayésienne

---

- ❖ On utilise le théorème de Bayes / approche fréquentiste

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

$$P(w|D, \mathcal{H}) = \frac{P(D|\mathcal{H}, w)P(w|\mathcal{H})}{P(D|\mathcal{H})}$$

$$\mathcal{L} = P(D|w) = \prod_i P(d_i|w)$$

$$P(w|D) \simeq P(D|w) P(w)$$

$$\log \mathcal{L} = \sum_i \log (P(d_i|w))$$

$$w_{ML} = \text{Max}_w P(D|w)$$

- ❖ le lien entre l'hypothèse et les observations est souvent trop complexe pour l'utilisation directe des données brutes
- ❖ Découpage de la chaîne d'analyse en plusieurs étapes

# Filtrage linéaire

- ❖ Estimation d'un signal à partir d'une mesure bruitée : Filtrage de Wiener (simplifié) et ses variantes - données  $d(t)$  somme d'un signal  $a(t)$  et d'un bruit  $b(t)$
- ❖ Estimation linéaire de  $a(t)$  à partir des données  $d(t)$  (convolution) -
  - ❖ Filtre  $H(z)$  dans le domaine de Laplace  $H(z)$  ou Fourier  $H(j\omega)$

*(signal et bruit indépendant, admettant une transformée de Fourier)*

$$d(t) = a(t) + n(t)$$

$$H(z) = \frac{S_{da}(z)}{S_{dd}(z)} \quad \longrightarrow \quad H(j\omega) = \frac{|F_a(j\omega)|^2}{|F_a(j\omega)|^2 + |F_n(j\omega)|^2}$$

- ❖ Réponse linéaire + bruit (déconvolution) - Expression après discretisation sous forme matricielle - meilleur estimateur (minimise la variance de l'erreur)

$$\begin{aligned} (d) &= \mathbf{R} \cdot (a) + (n) & \mathbf{H} &= (\mathbf{R}^\dagger \mathbf{N}^{-1} \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^\dagger \mathbf{N}^{-1} \\ (\hat{a}) &= \mathbf{H} \cdot (d) & \mathbf{N} &= \langle (n)^\dagger \cdot (n) \rangle \end{aligned}$$

with

---

# Dans le cas des observations interférométriques du signal à 21 cm extragalactique

---

$$\begin{aligned} s_i(\nu) &= \iint d\hat{n} E(\hat{n}, \nu) D_i(\hat{n}, \lambda) e^{i(\vec{k}_{EM} \cdot \vec{r})} & L(\hat{n}, \nu) &= D_i(\hat{n}, \nu) D_j^*(\hat{n}, \nu) \\ \mathcal{V}_{ij}(\nu) &= \langle s_i(\nu) s_j(\nu)^* \rangle & I(\hat{n}, \nu) &= E(\hat{n}, \nu) E^*(\hat{n}, \nu) \\ & & \mathcal{V}_{ij}(\nu) &= \iint d\hat{n} I(\hat{n}, \nu) L(\hat{n}, \nu) e^{i(\vec{k}_{EM} \cdot \Delta \vec{r}_{ij})} \end{aligned}$$

## Visibilités

- ❖ Traitement des mesures de visibilités  $V_{ij}(\nu, t)$  ( flot temporel)
  - ❖ suppression RFI, filtrage temps-fréquence, calibration ...
- ❖ **Reconstruction des cartes tridimensionnel du ciel  $\text{Sky}(\alpha, \delta, \nu)$  à partir des visibilités**
- ❖ **Séparation des composantes ou suppression des avant-plans**
  - ❖ sur les cartes et/ou à partir des spectres de puissances
- ❖ Calcul des spectres de puissances

# Reconstruction des cartes (imagerie) en interférométrie

# Des visibilités aux cartes

$$s_i(\nu) = \iint d\hat{n} E(\hat{n}, \nu) D_i(\hat{n}, \lambda) e^{i(\vec{k}_{EM} \cdot \vec{r})}$$

$$L(\hat{n}, \nu) = D_i(\hat{n}, \nu) D_j^*(\hat{n}, \nu)$$

$$I(\hat{n}, \nu) = E(\hat{n}, \nu) E^*(\hat{n}, \nu)$$

$$\mathcal{V}_{ij}(\nu) = \langle s_i(\nu) s_j(\nu)^* \rangle$$

$$\mathcal{V}_{ij}(\nu) = \iint d\hat{n} \underbrace{I(\hat{n}, \nu)}_{\text{Signal du ciel}} \underbrace{L(\hat{n}, \nu)}_{\text{réponse (lobe) d'antenne}} e^{i(\vec{k}_{EM} \cdot \Delta \vec{r}_{ij})}$$

Visibilité

Angular domain

$$\hat{n} \rightarrow (\alpha, \beta)$$

$$I(\alpha, \beta, \nu)$$

$$L(\alpha, \beta, \nu)$$

Angular frequency (u,v) plane

$$(u, v)$$

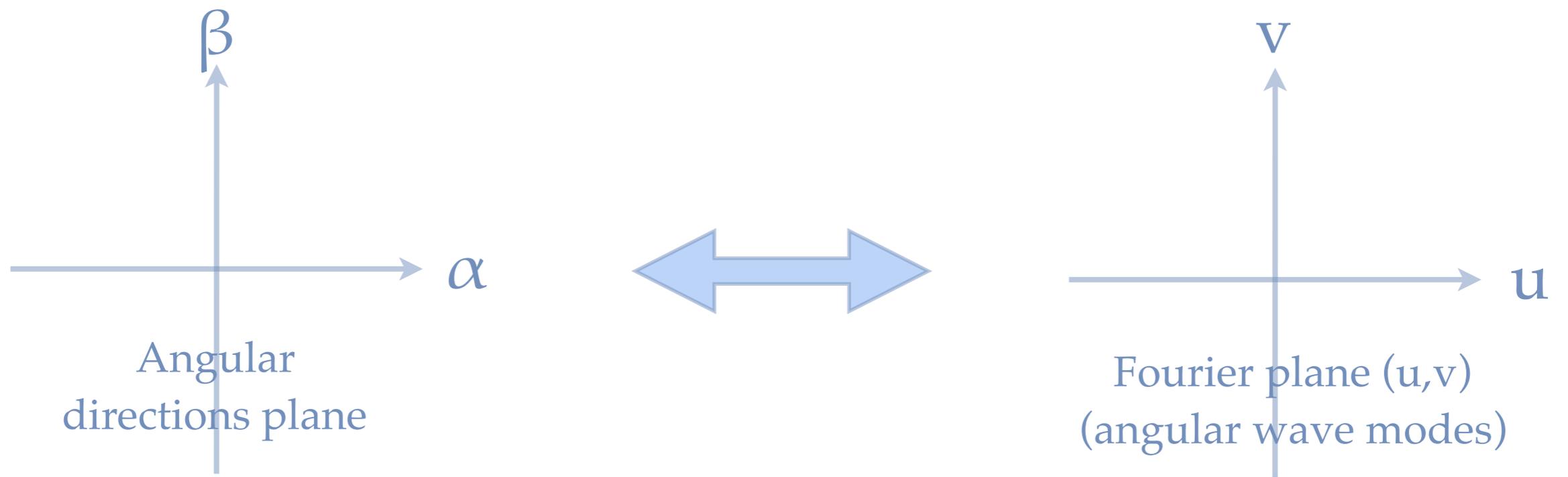
$$\mathcal{I}((u, v), \nu)$$

$$\mathcal{L}((u, v), \nu)$$

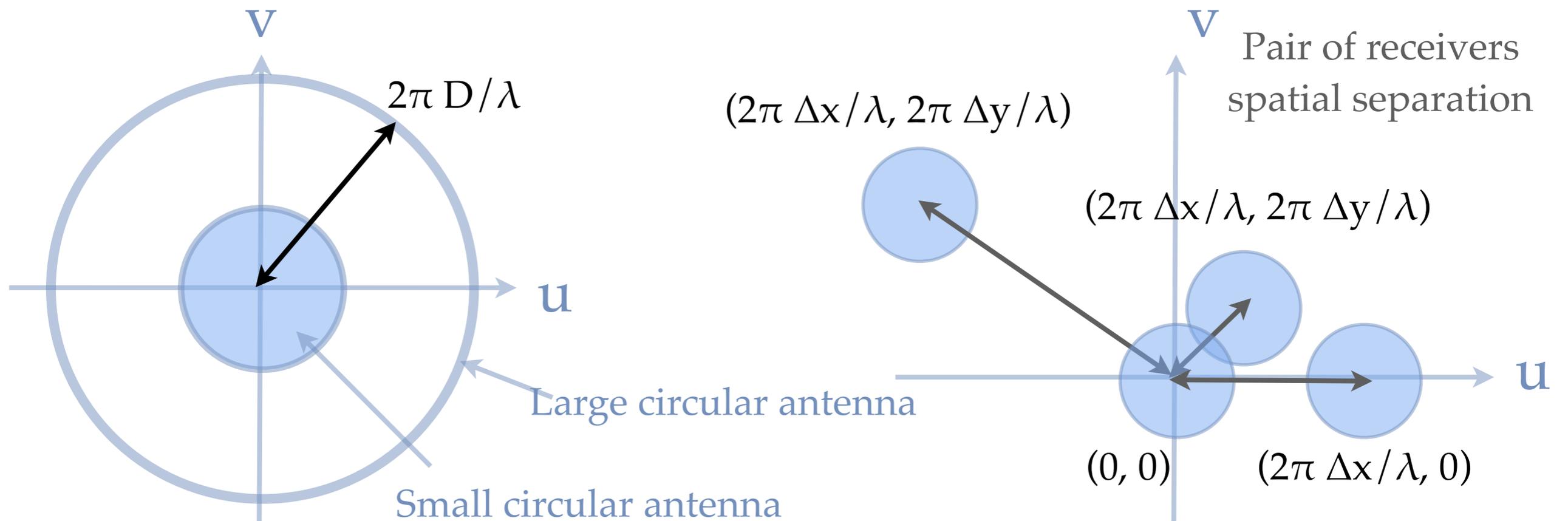
$$\mathcal{V}_{ij}(\nu \rightarrow \lambda) \simeq \iint dudv \mathcal{I}((u, v), \nu) \mathcal{L}(u - \frac{\Delta x_{ij}}{\lambda}, v - \frac{\Delta y_{ij}}{\lambda}, \nu)$$

Une mesure de visibilité correspond à une mesure (pondérée) dans le plan de Fourier (u,v)

⇒ Utilisation de la transformée de Fourier (FFT) en vue de résoudre le problème de la reconstruction des cartes (Imagerie)



### (u,v) plane response

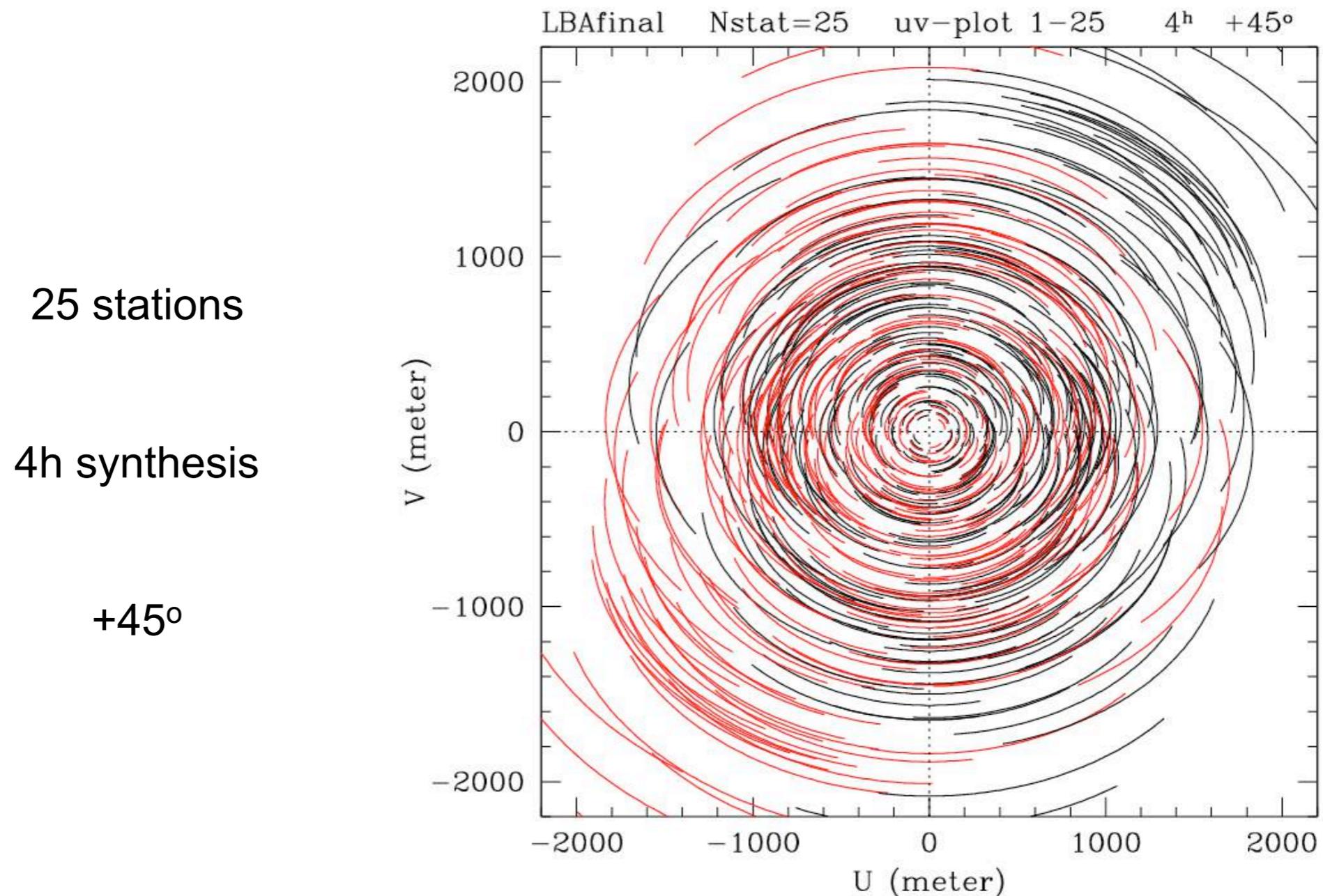


# Problème: couverture du plan (u,v)

➡ Rotation synthesis (suivi de source)

uv-coverage for LOFAR LBA (core only)

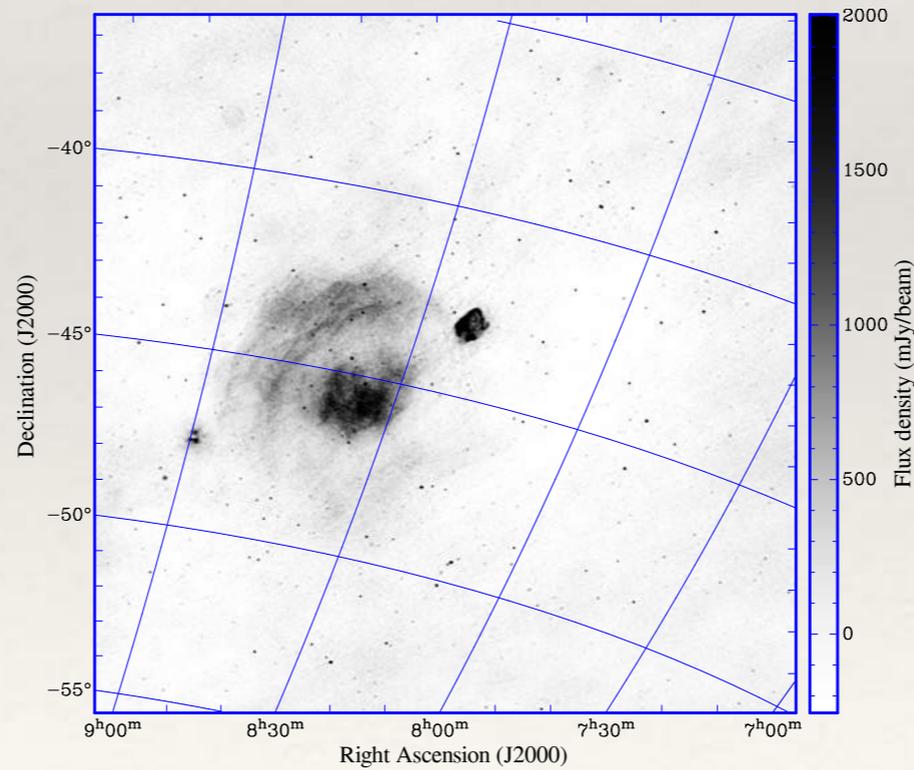
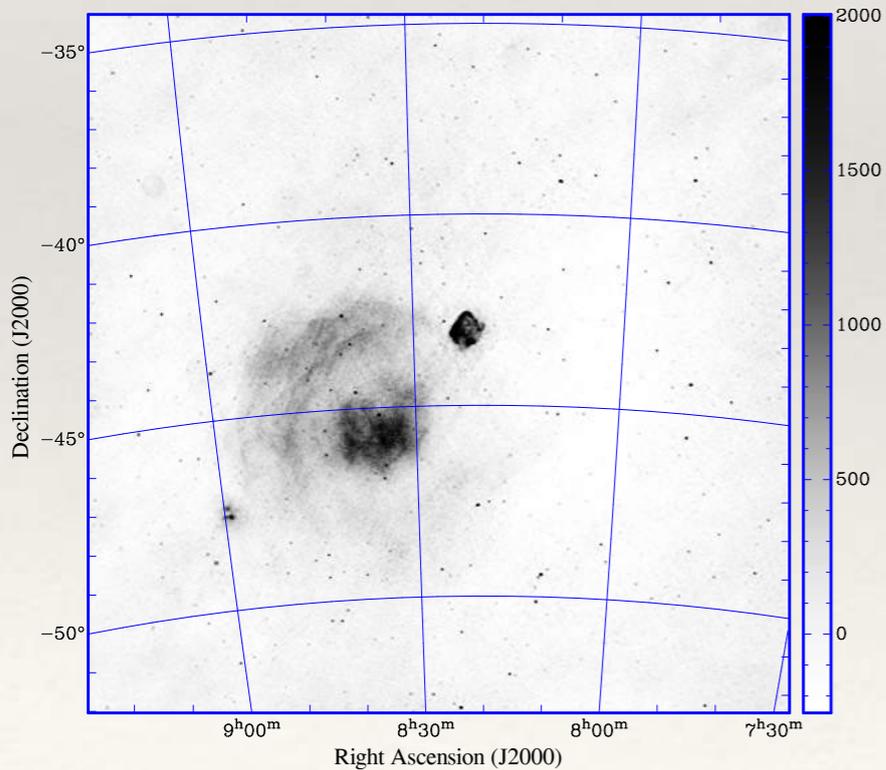
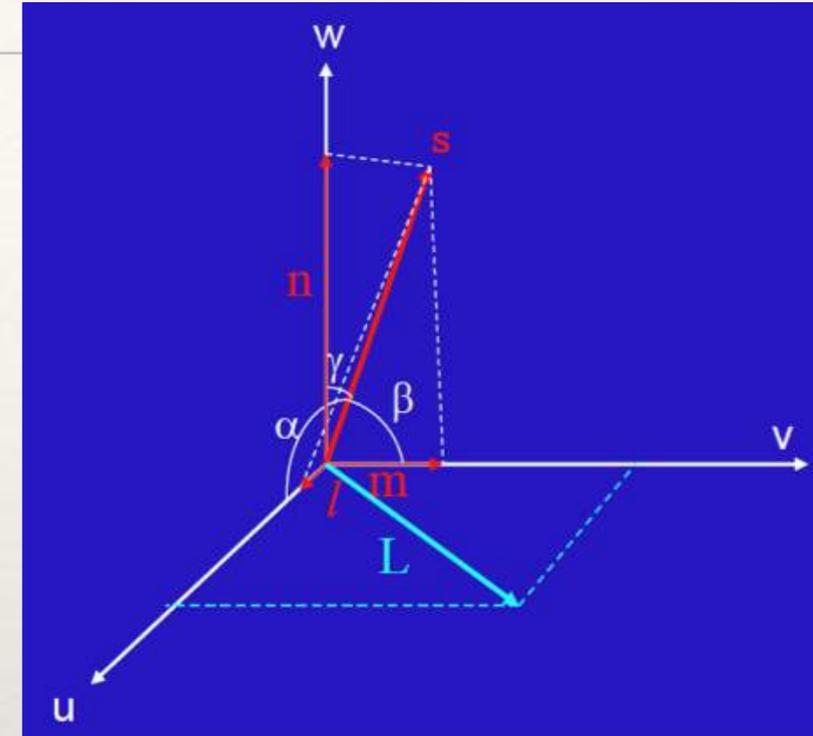
Slide borrowed from Ger de Bruyn (Astron/NL)



# Ça se complique: couverture incomplète, w-term, sans parler de la calibration ...

$$l = \cos(\alpha), \quad m = \cos(\beta), \quad n = \cos(\gamma) = \sqrt{1 - l^2 - m^2}$$

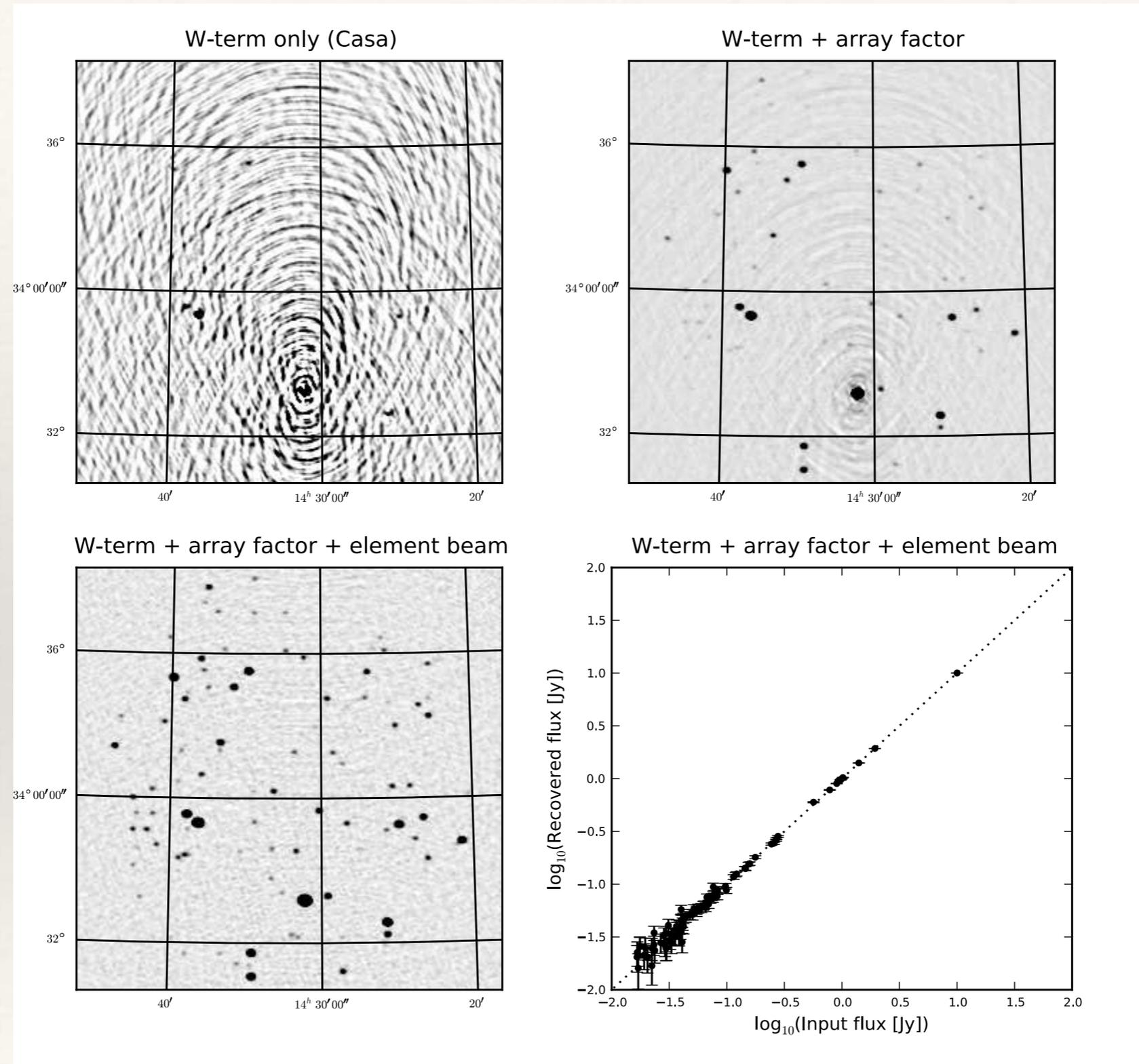
$$V_{ij}(u, v, w) = \int A_{ij}(l, m, n) I(l, m, n) e^{-i2\pi[ul+vm+w(n-1)]} \frac{dl dm}{\sqrt{1 - l^2 - m^2}}$$



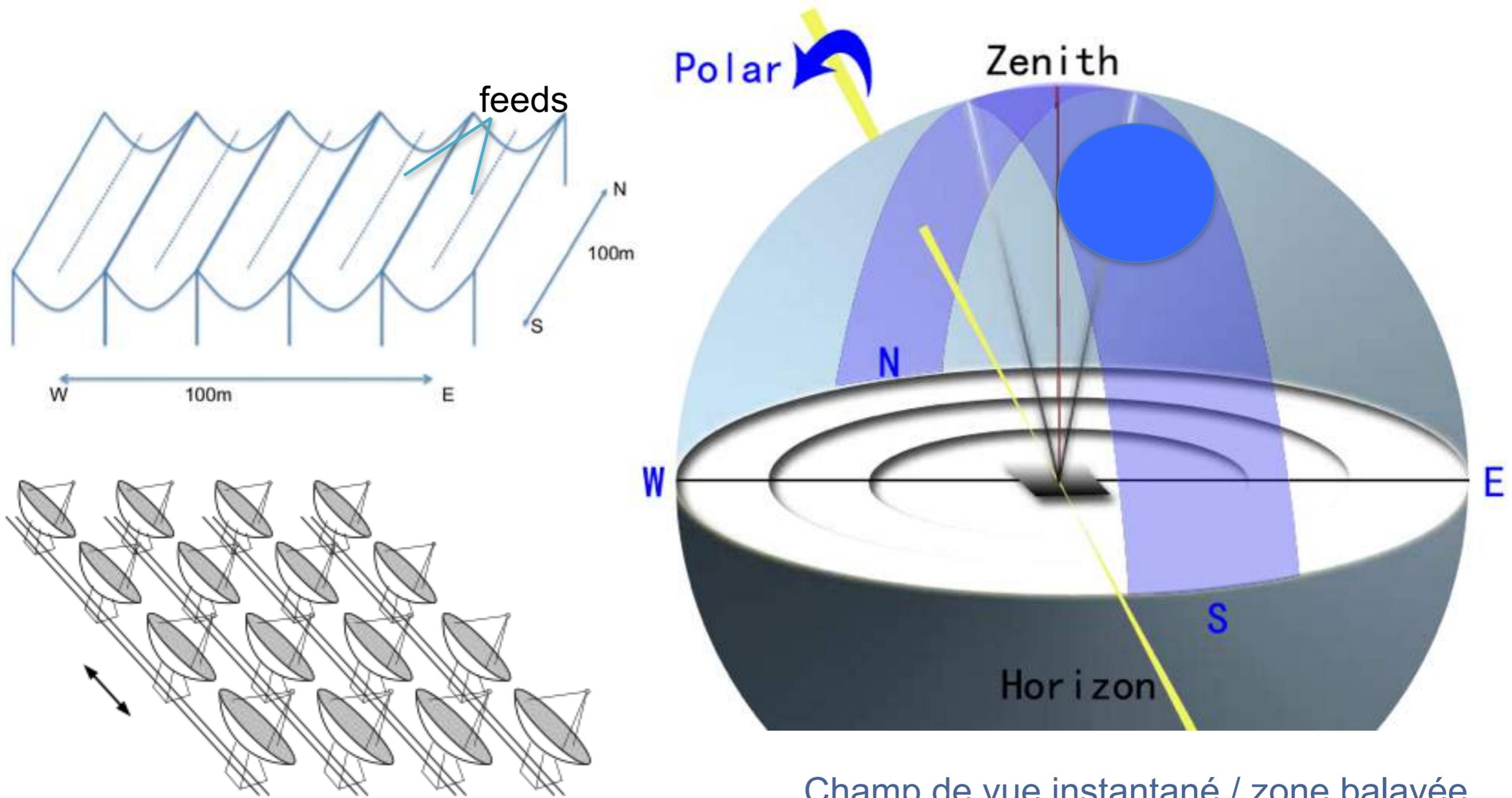
Observations des  
SNR Vella et  
Puppis, avec  
MWA @ 149 MHz

# Applying full polarization A-Projection to very wide field of view instruments: An imager for LOFAR

C. Tasse<sup>1,2,3</sup>, B. van der Tol<sup>4</sup>, J. van Zwieten<sup>5</sup>, Ger van Diepen<sup>5</sup>, and S. Bhatnagar<sup>6</sup>

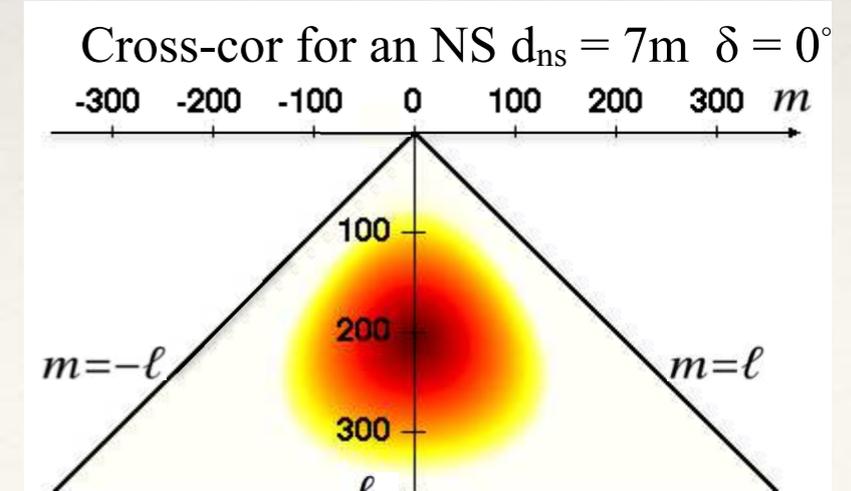
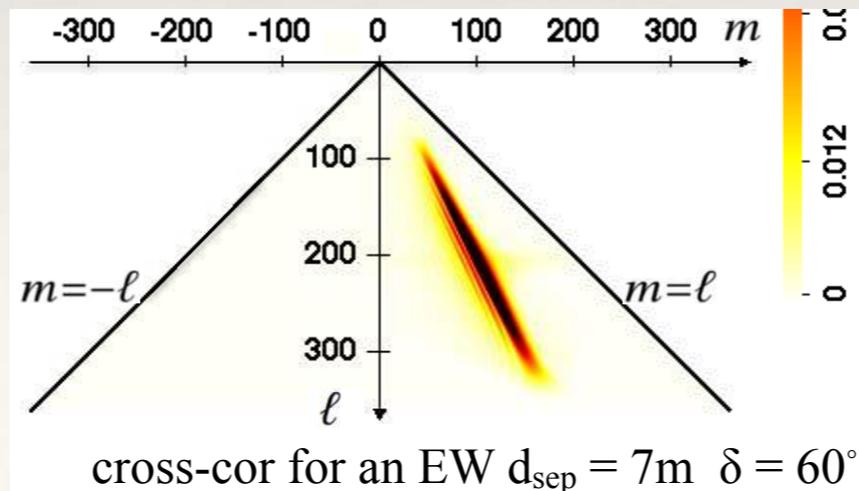
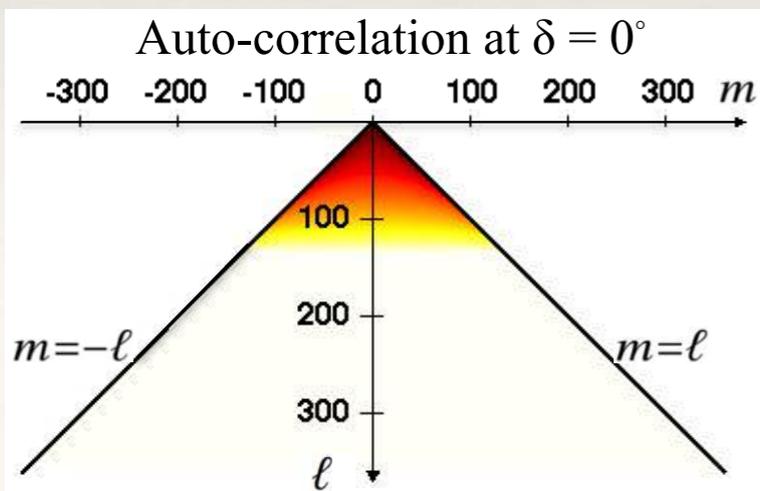
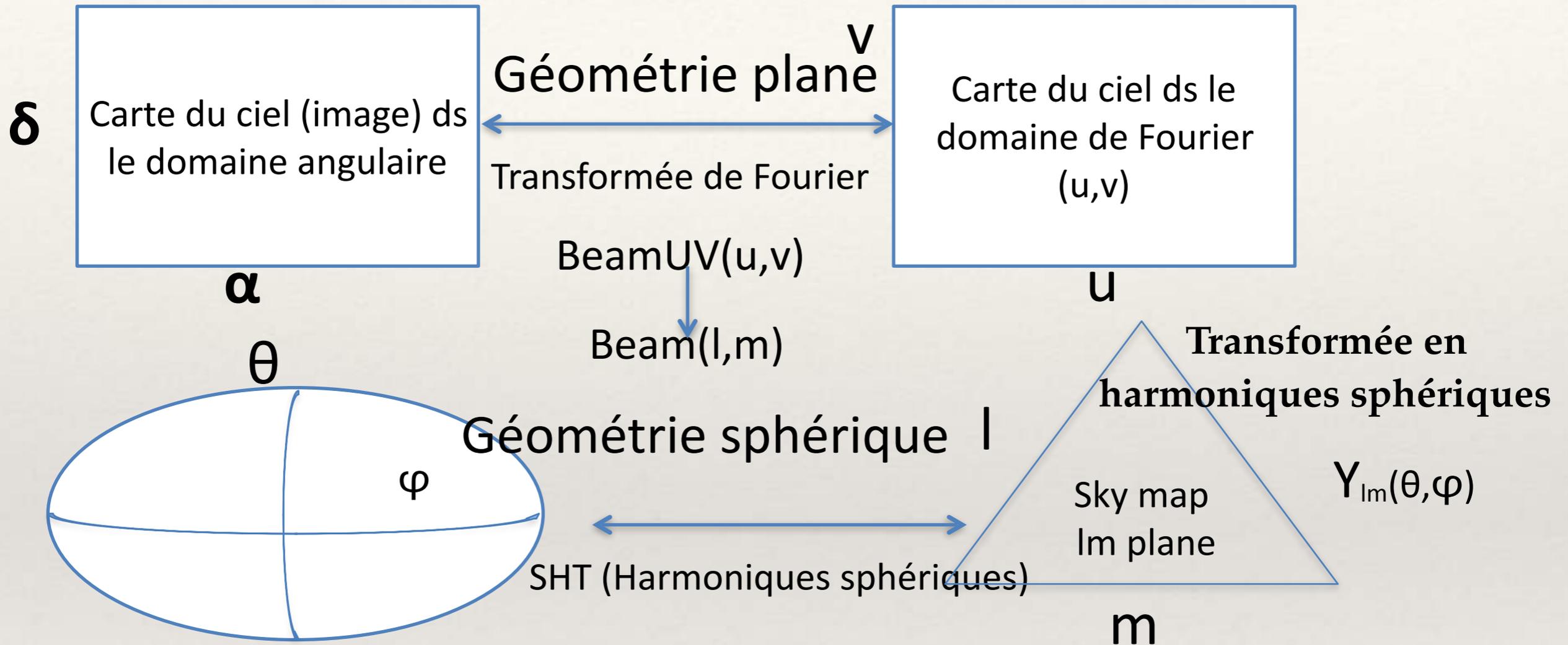


# Reconstruction des cartes (imagerie): géométrie sphérique et observations en mode transit (I)



Champ de vue instantané / zone balayée

# Reconstruction des cartes (imagerie): géométrie sphérique et observations en mode transit (II)



# Reconstruction des cartes (Imagerie): décomposition en modes- m des harmoniques sphériques (I)

$$\mathcal{V}_{ij} = \iint I(\hat{\mathbf{n}}) L(\hat{\mathbf{n}}) e^{i\mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{r}_{ij}} d\hat{\mathbf{n}} \xrightarrow{\text{discretisation}} [\mathcal{V}_{ij}(t)] = \mathbf{L}_{ij}(t) \times [I(\hat{\mathbf{n}})] + [n_{ij}(t)]$$

Il faut résoudre un système linéaire - **mais de très grande taille** :

**2. 10<sup>6</sup> x 2. 10<sup>7</sup>** , pour une carte de ciel de 10' de résolution, 24 heures d'observation avec un interféromètre de 50 éléments !

Astuce : décomposer sur la base des harmoniques sphériques, les différents modes m sont alors indépendants , pour des observations en mode transit de 24 heures (couverture complète Est-Ouest)

$$I(\hat{\mathbf{n}}) = \sum_{\ell=0}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} \mathcal{I}_{\ell,m} Y_{\ell,m}(\hat{\mathbf{n}})$$

$$\tilde{\mathcal{V}}_{ij}(m) = \sum_{\ell=|m|}^{+\ell_{\max}} (-1)^m \mathcal{I}(\ell, m) \mathcal{L}_{ij}(\ell, -m)$$

$$\begin{aligned} L_{ij}(\hat{\mathbf{n}}) &= D_i^*(\hat{\mathbf{n}}) D_j(\hat{\mathbf{n}}) e^{i\mathbf{k} \Delta \mathbf{r}_{ij}} \\ &= \sum_{\ell=0}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} \mathcal{L}_{ij}(\ell, m) Y_{\ell,m}(\hat{\mathbf{n}}) \end{aligned}$$

$$\tilde{\mathcal{V}}_{ij}^*(-m) = \sum_{\ell=|m|}^{+\ell_{\max}} \mathcal{I}(\ell, m) \mathcal{L}_{ij}^*(\ell, m)$$

Shaw et al. 2014, arXiv:1302.0327

Zhang, Ansari et al. 2016, arXiv:1302.0327

$$\left[ \tilde{\mathcal{V}} \right]_m = \mathbf{L}_m \times [\mathcal{I}(\ell)]_m + [\tilde{n}]_m$$

# Reconstruction des cartes (Imagerie): décomposition en modes- m des harmoniques sphériques (II)

$$\begin{array}{c}
 \left[ \mathcal{V}_{ij} \right] = \left[ \mathcal{L}_{ij}(\vec{\hat{n}}) \right] \times \left[ \mathcal{I}(\vec{\hat{n}}) \right] + \left[ n_{ij} \right] \leftarrow \text{noise (vector)} \\
 \uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \qquad \swarrow \\
 \text{Set of visibilities} \quad \text{Matrix encoding} \quad \text{Vector representing} \\
 \text{(vector)} \qquad \qquad \text{instrument response} \\
 \qquad \qquad \qquad \text{scan strategy} \qquad \qquad \text{the sky brightness}
 \end{array}$$

$$\left[ \mathcal{V}_{ij} \right] = \left[ \mathcal{L}_{ij}(\ell, m) \right] \times \left[ \mathcal{I}(\ell, m) \right] + \left[ n_{ij} \right] \quad n_{\alpha_p} \times n_{\delta_p} \times N_b$$

$$\begin{pmatrix} V_{ij}^{\delta_p}(\alpha_0) \\ V_{ij}^{\delta_p}(\alpha_1) \\ \dots \\ V_{ij}^{\delta_p}(\alpha_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_0)e^{im\alpha_0} & \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_1)e^{im\alpha_0} & \dots & \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_x)e^{im\alpha_0} \\ \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_0)e^{im\alpha_1} & \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_1)e^{im\alpha_1} & \dots & \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_x)e^{im\alpha_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_0)e^{im\alpha_n} & \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_1)e^{im\alpha_n} & \dots & \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_x)e^{im\alpha_n} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathcal{I}(\ell, m_0) \\ \mathcal{I}(\ell, m_1) \\ \dots \\ \mathcal{I}(\ell, m_x) \end{pmatrix} + \text{noise}$$

$\longleftarrow \qquad \qquad \qquad \longrightarrow$   
 $\ell_{max} \times \ell_{max}$

# Reconstruction des cartes (Imagerie): décomposition en modes- m des harmoniques sphériques (III)

La décomposition en modes-m des harmoniques sphériques permet de transformer l'énorme matrice L en une matrice bloc diagonal - la taille de chaque bloc est alors  $10^3 - 10^4$  fois plus petite que la matrice originale (méthode applicable pour des observations ayant une couverture Est-Ouest complète)

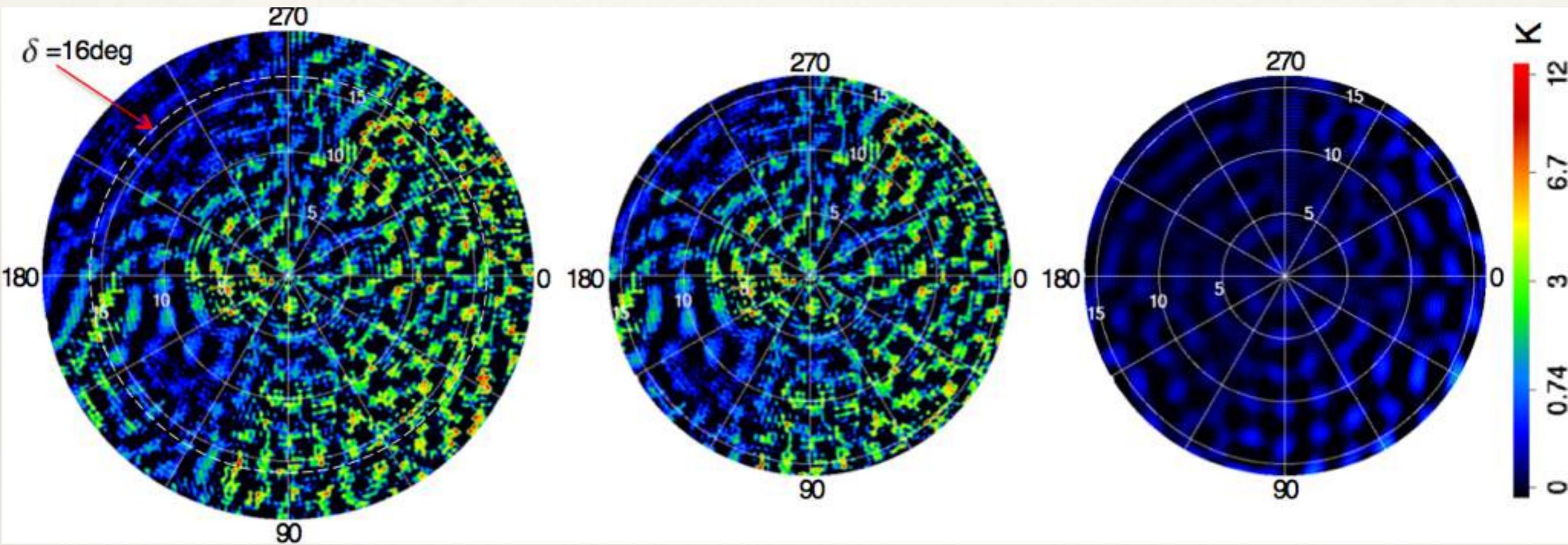
$$\begin{matrix} \ell_{max} \times N_b \times n_{\delta_p} \\ \updownarrow \\ \begin{pmatrix} \tilde{V}_{ij}^{\delta_p}(m_0) \\ \tilde{V}_{ij}^{\delta_p}(m_1) \\ \dots \\ \tilde{V}_{ij}^{\delta_p}(m_{max}) \end{pmatrix} \\ \downarrow \end{matrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_0) & & & \\ & \boxed{\mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_1)} & & 0 \\ & 0 & \dots & \\ & & & \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_{max}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathcal{I}(\ell, m_0) \\ \mathcal{I}(\ell, m_1) \\ \dots \\ \mathcal{I}(\ell, m_{max}) \end{pmatrix} \begin{matrix} \ell_{max} \times \ell_{max} \\ \updownarrow \\ + noise \\ \downarrow \end{matrix}$$

$\mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_1)$   $\downarrow$   $\mathbf{L}_{m_i}$

$$[\tilde{\mathbf{V}}]_m = \mathbf{L}_m \times [\mathcal{I}(\ell)]_m + [\tilde{\mathbf{n}}]_m$$

inversion  $\rightarrow$   $\mathbf{H}_m$

# Carte reconstruite pour une observation du ciel autour du pôle nord céleste avec Tianlai (Simulation)



Applying high pass filter to the LAB map

Reconstructed map with filtering

The difference between left and center

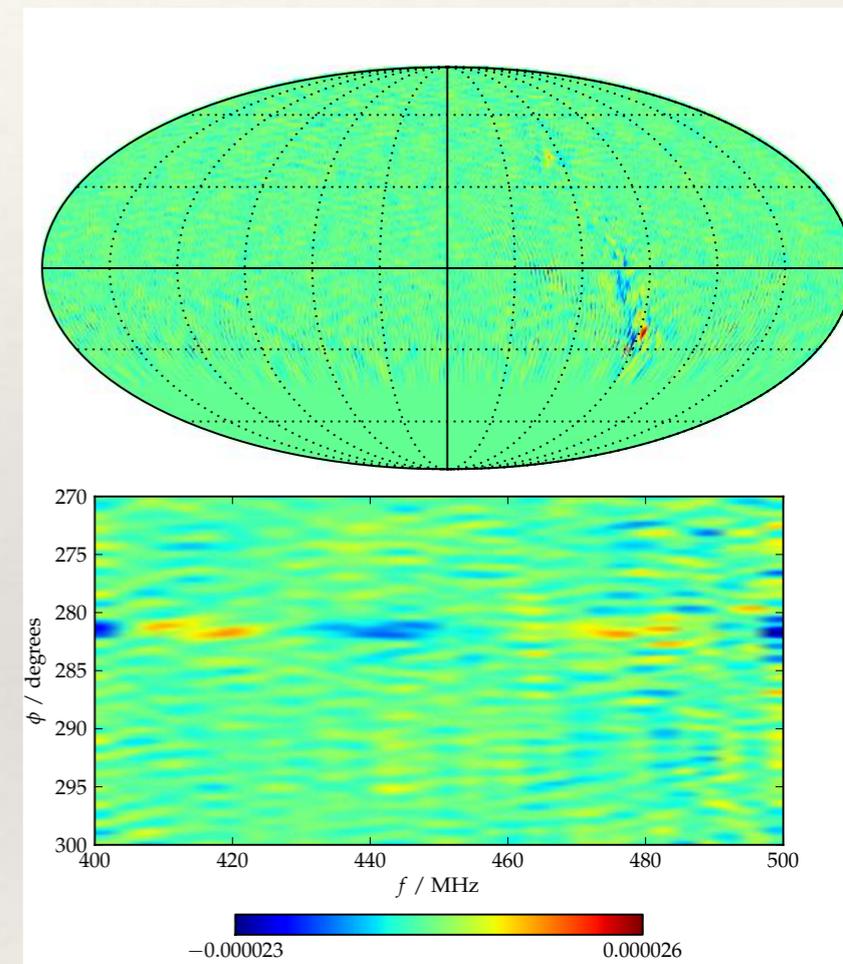
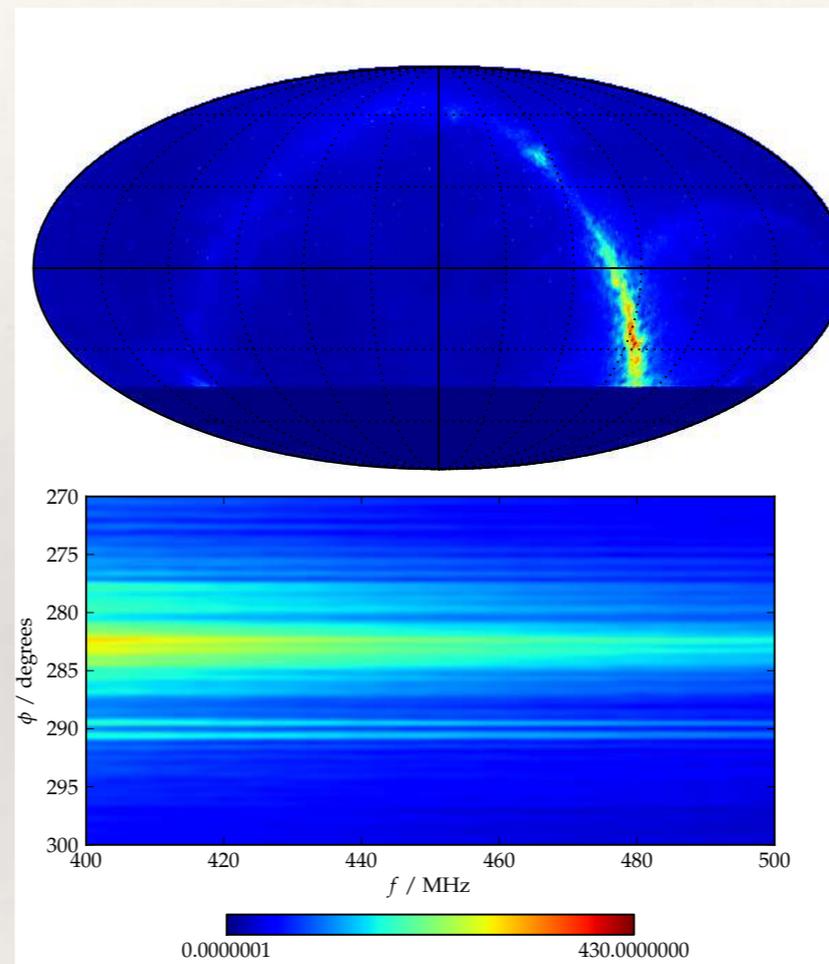
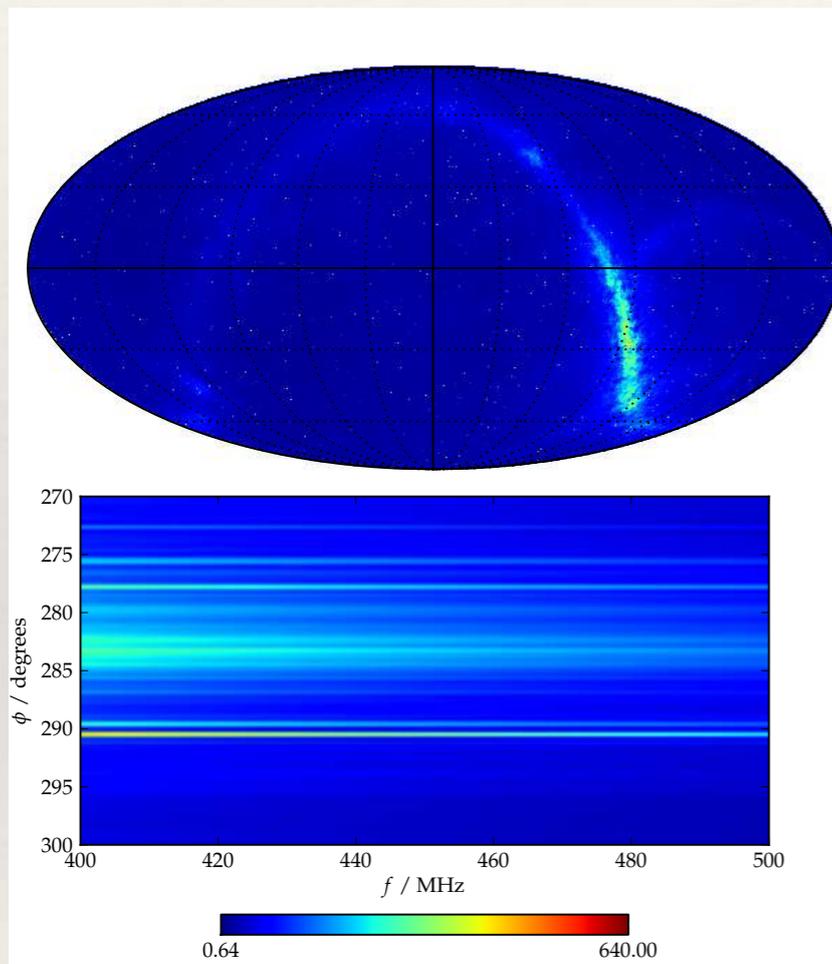
# Carte reconstruite pour des observations avec CHIME (réflecteurs cylindriques - Simulations)

Original

Observed

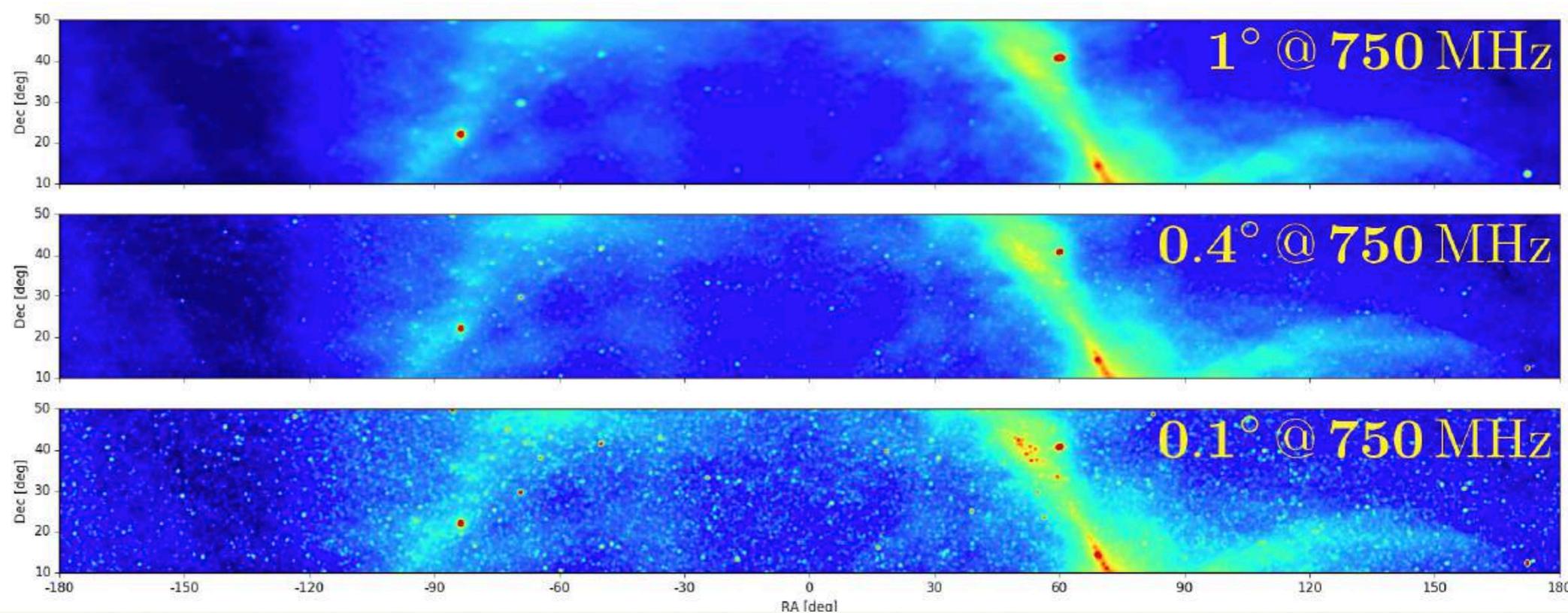
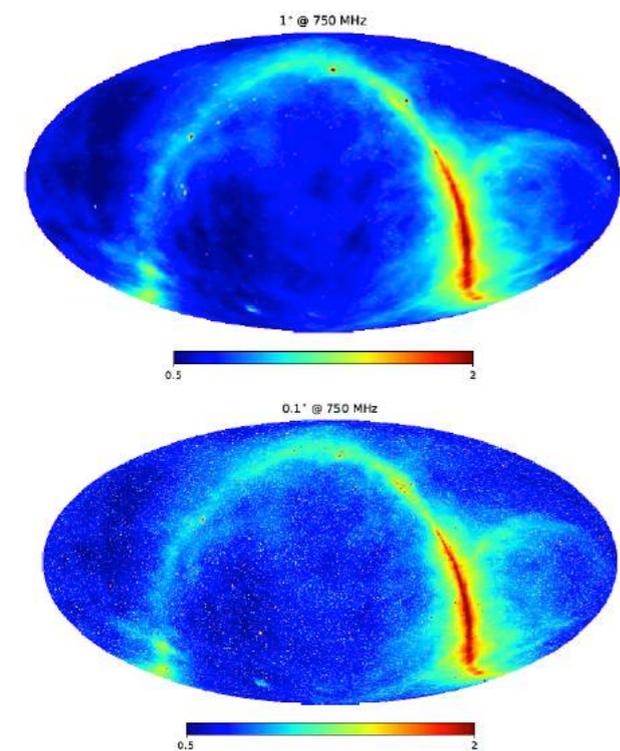
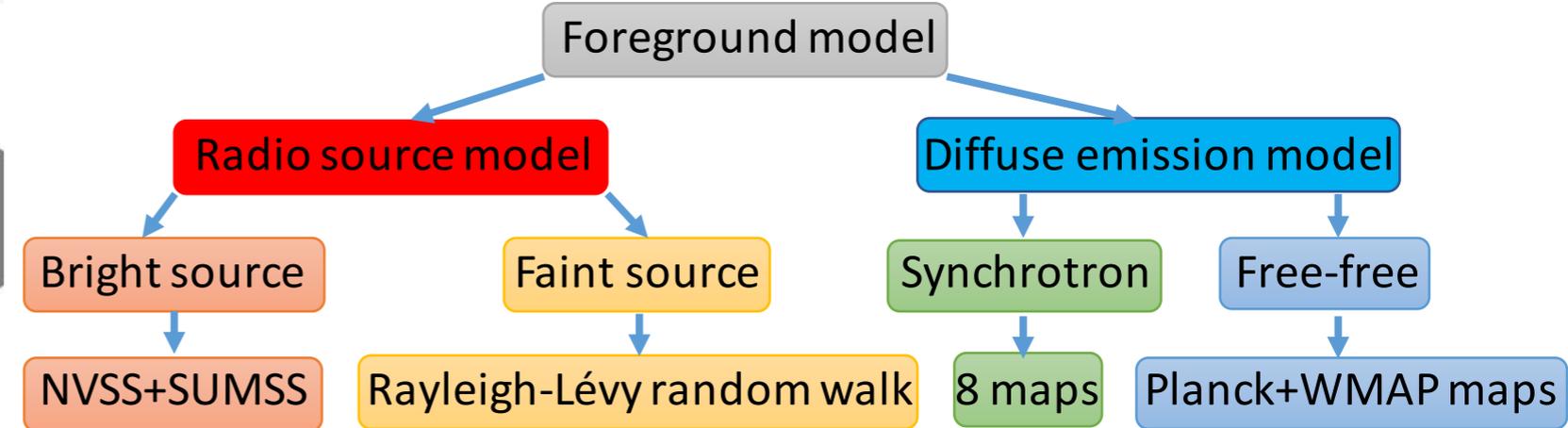
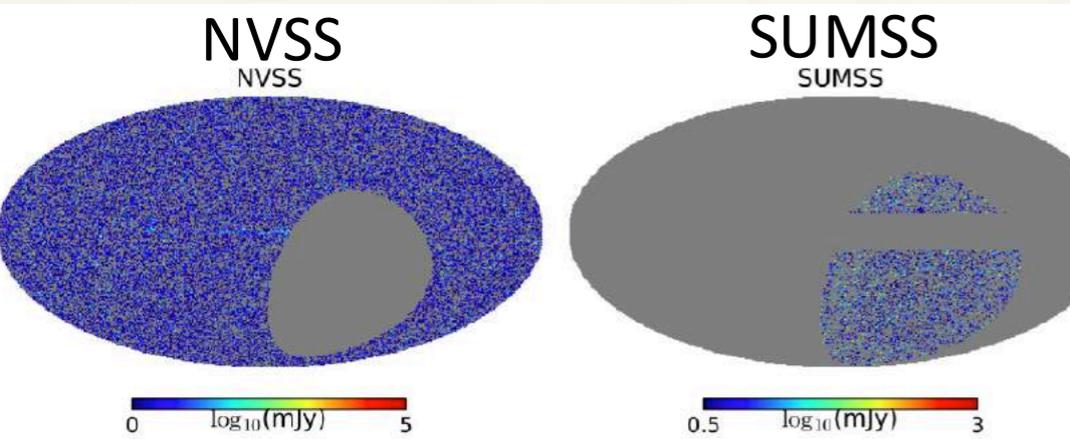
Foreground Filtered

Foregrounds



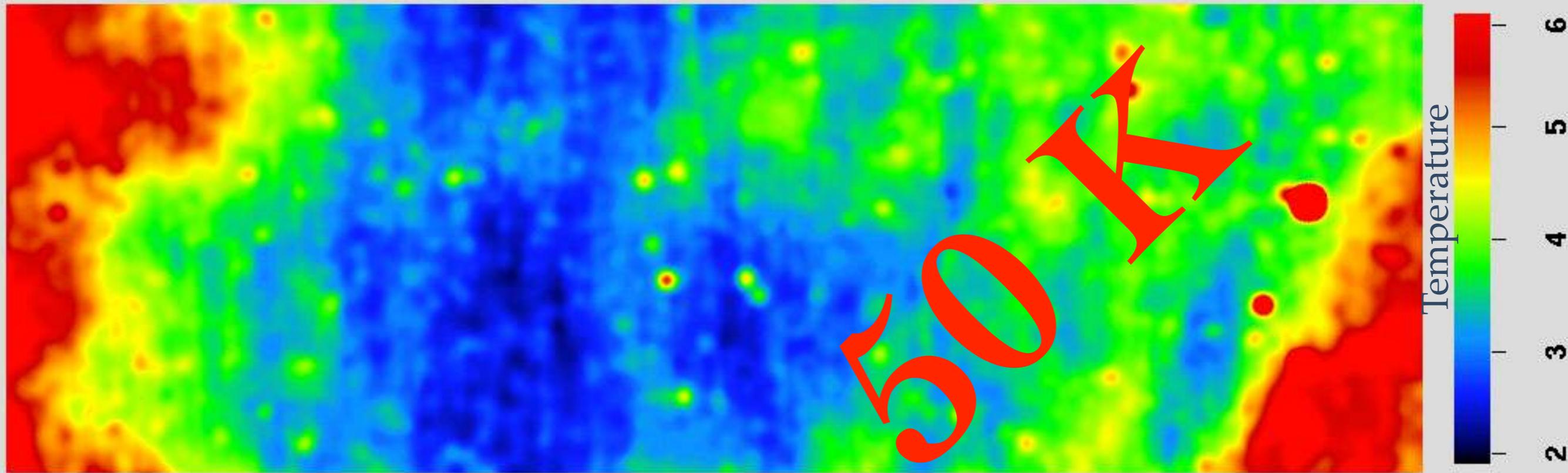
Séparation des composantes /  
soustraction des avant-plans

# Les avant-plans (synchrotron Galactique et sources radio)



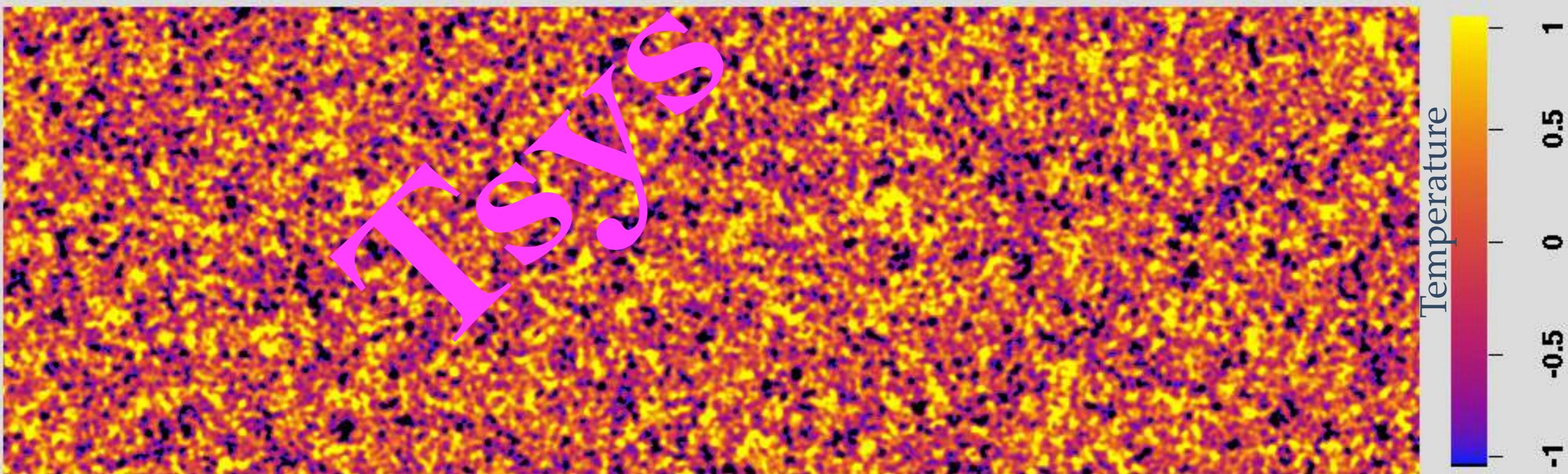
Avant-plan Radio (GSM) @ 720 MHz ( $z=1.$ ) - Kelvin

K



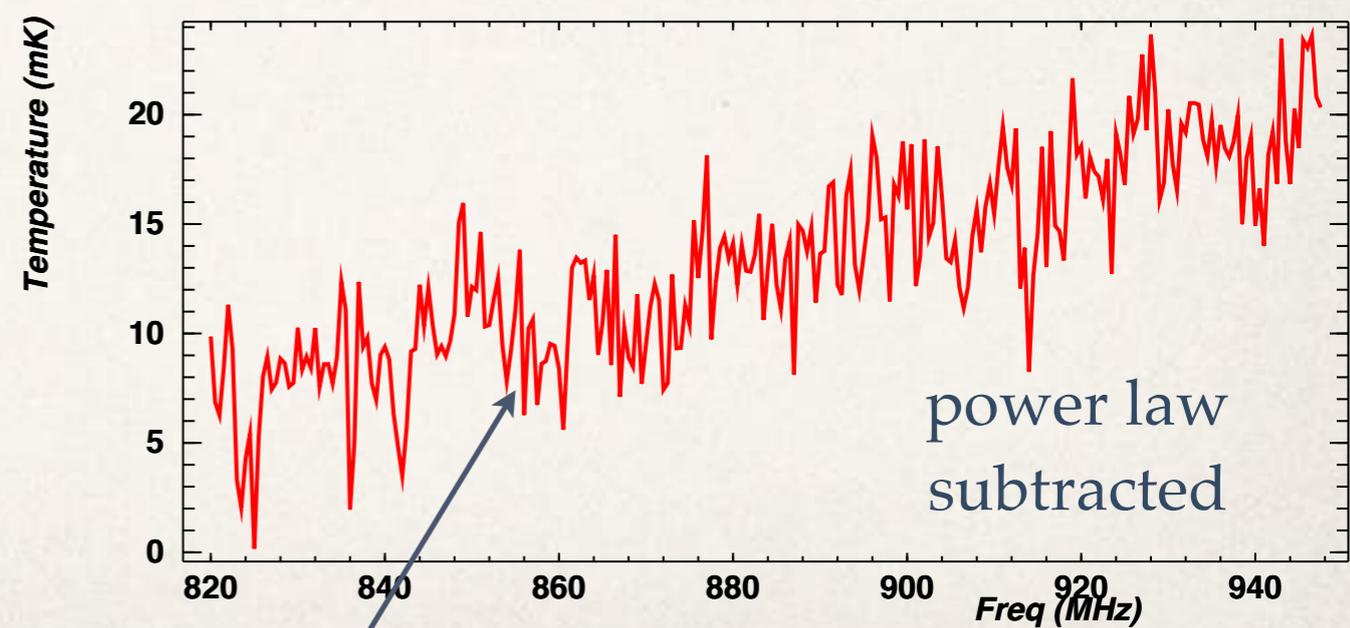
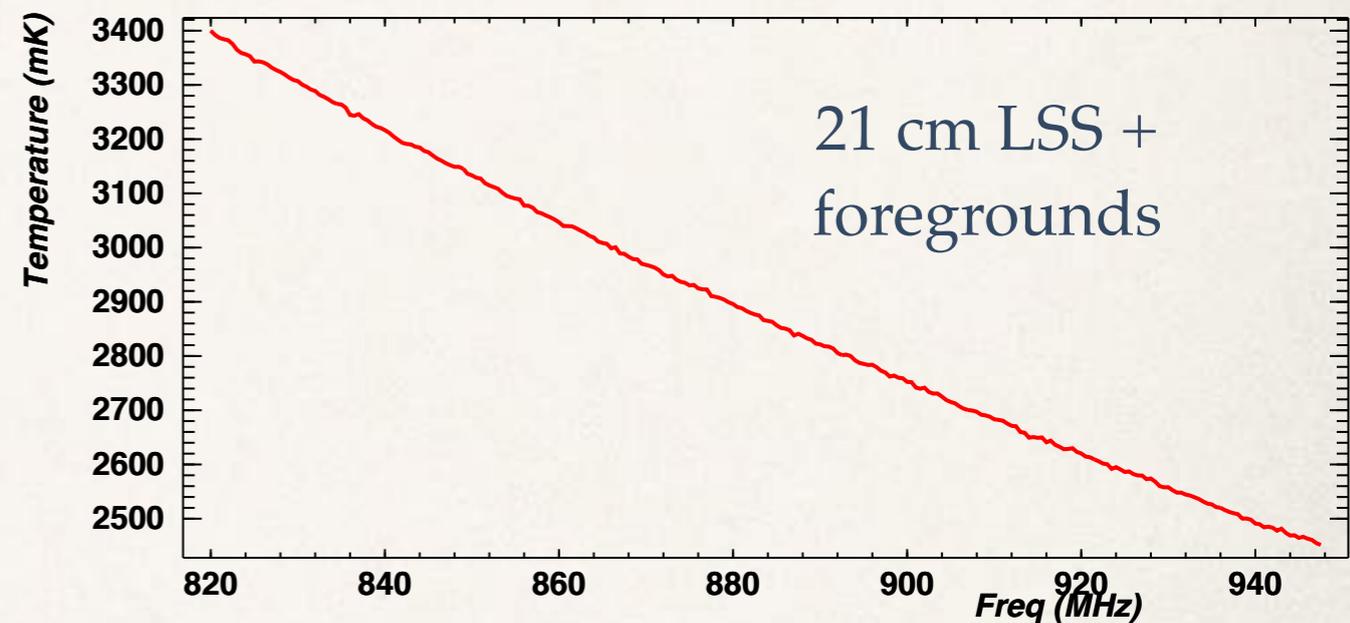
21 cm @ 720 MHz ( $z=1.$ ) - milliKelvin

mK



# Synchrotron et signal 21cm, évolution en fréquence ...

- ❖ Exploiter la dépendance spectrale des avants-plans (spectre en loi de puissance  $\propto \nu^\beta$ ) du rayt. synchrotron et des radio sources
- ❖ Effets instrumentaux (mode mixing) propagation des erreurs de soustraction ...



21 cm LSS signal

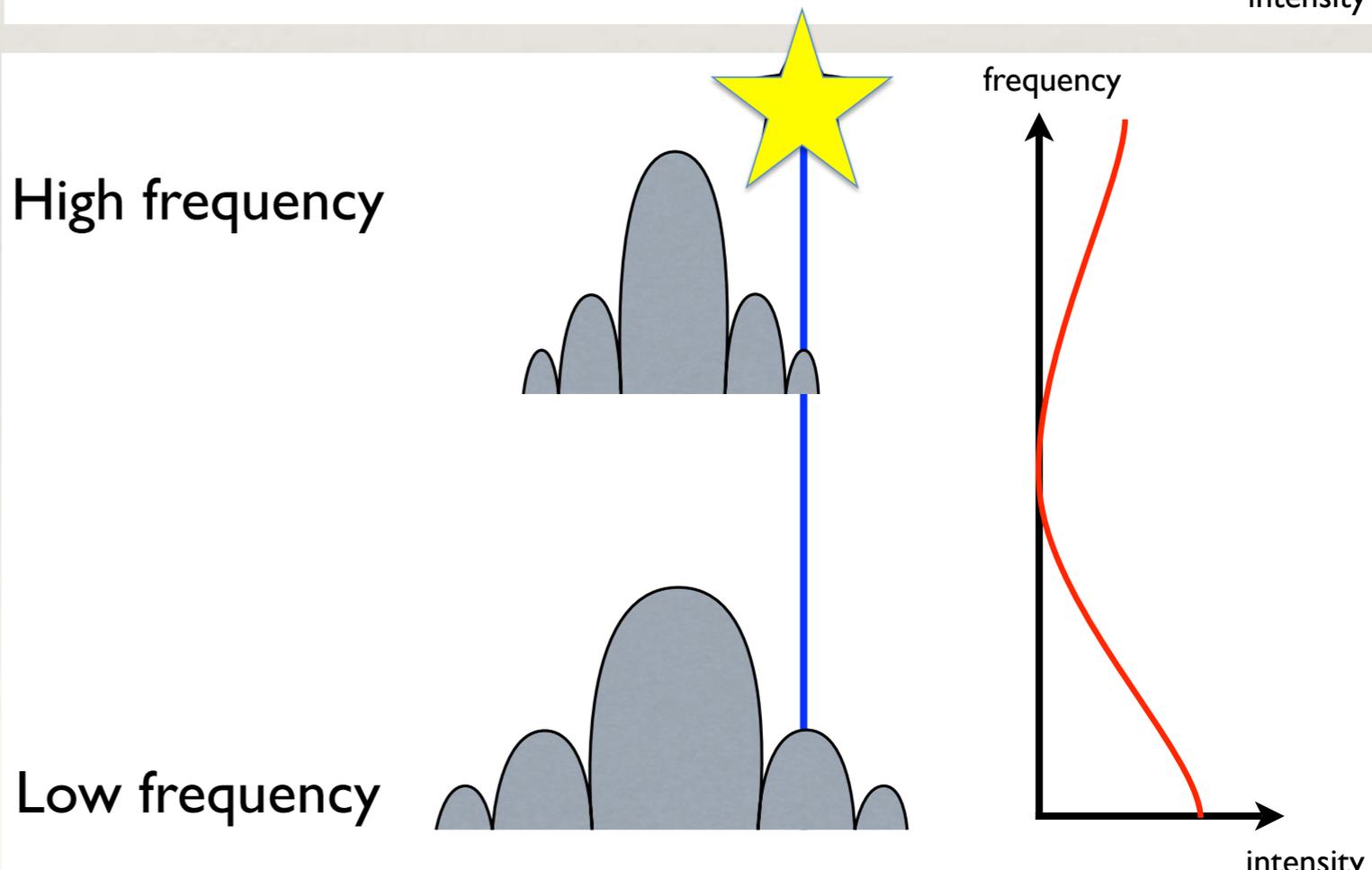
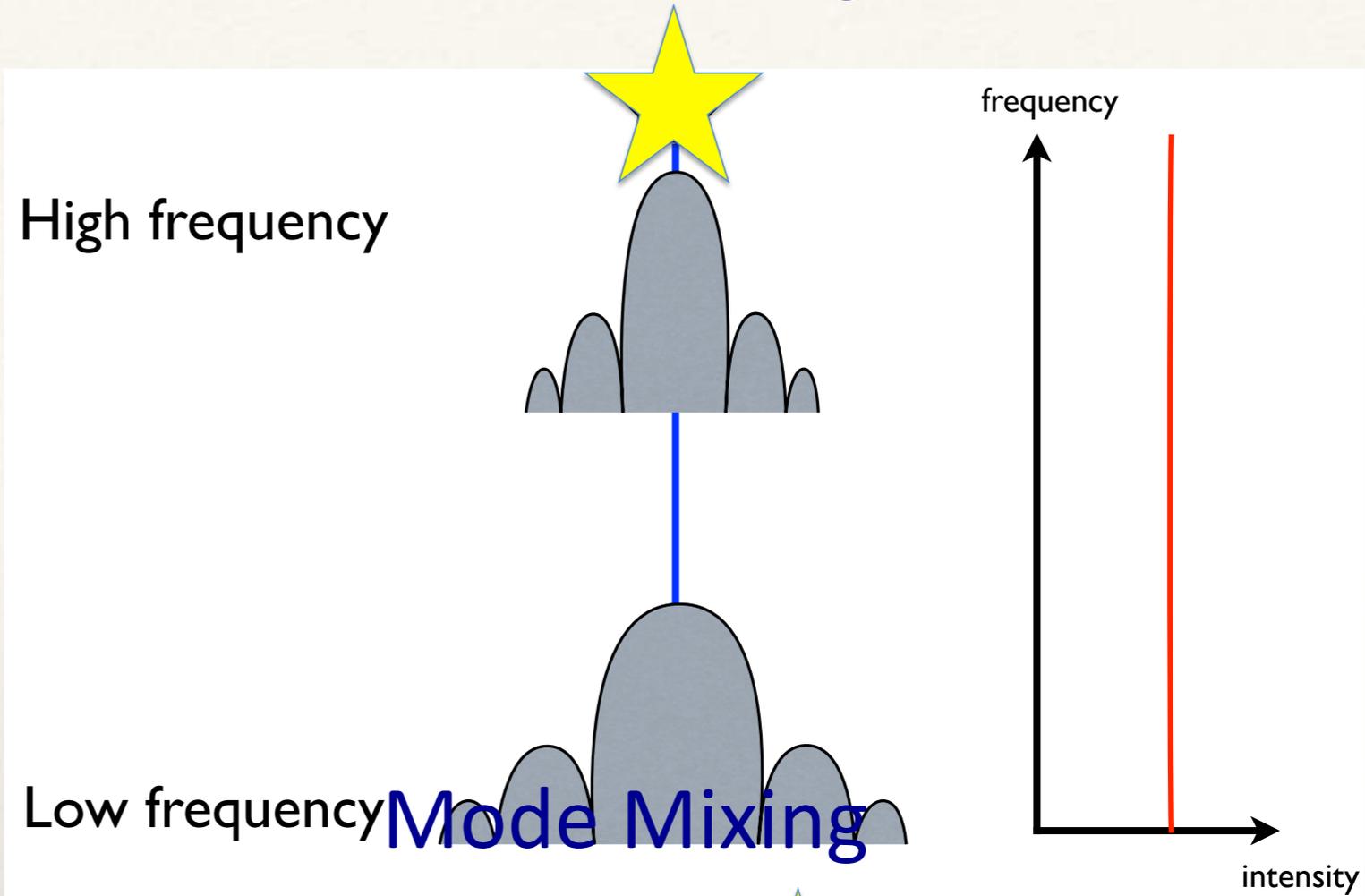
# Mode Mixing

Illustration par  
**Kris Sigurdson**  
UBC

En radio, la forme de la réponse (lobe) d'antenne est dominée par le phénomène de diffraction ( $\delta\theta \sim \lambda/D = c/(v D)$ )

La réponse instrumentale a donc une forte dépendance avec la longueur d'onde (ou la fréquence)  $L(v)$

Cette réponse  $L(v)$  est donc à l'origine d'un Couplage des modes de variation transverse  $k_{\perp}$  et longitudinal  $k_{\parallel}$



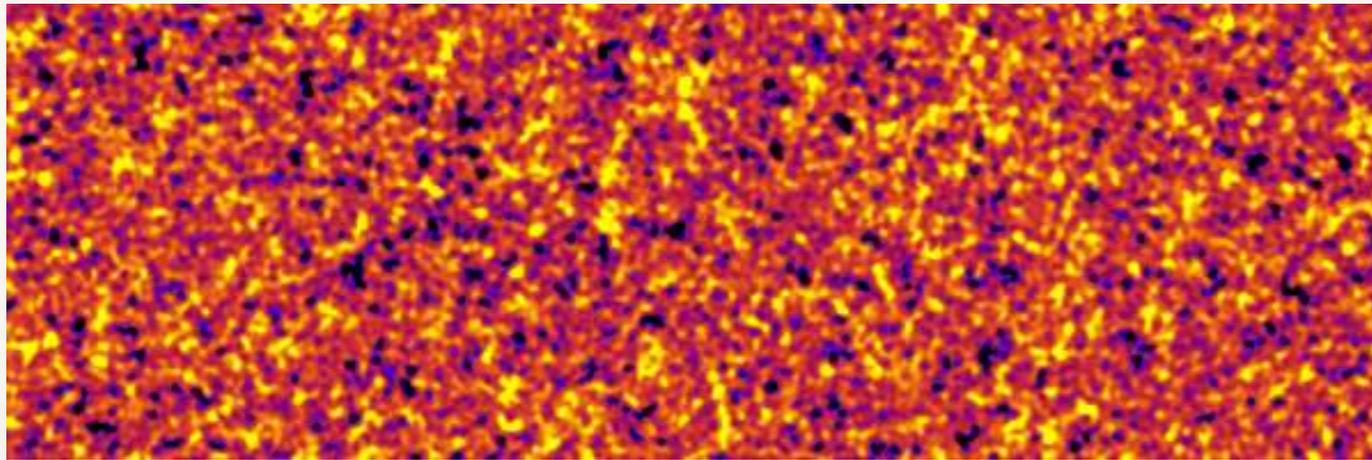
# Blind foreground subtraction

- Tested 3 different methods for IM:
  - **LOS fitting**: choose ad-hoc smooth functions. Usually polynomial fitting in log-log space.
  - **PCA**: uncorrelated sources maximizing the variance. Diagonalize  $v$ -covariance and subtract principal eigenvectors.
  - **ICA**: independent sources maximizing the variance. Find independent sources by maximizing non-Gaussianity. (See Wolz et al. ArXiv: 1310.8144 for a first application to IM). Equivalent to PCA for Gaussian foregrounds.
- Specs: 5 foregrounds, SKA1-MID setup, Gaussian noise, frequency dependent primary beam,  $400 < \nu < 800$  MHz

(See also: Gleser et al. 2008, Liu et al. 2009, Ricciardi et al., 2010, Harker et al. 2009, Hyvärinen et al. 1999, Chapman et al. 2012, Wolz et al. 2013, Chapman et al. 2013)

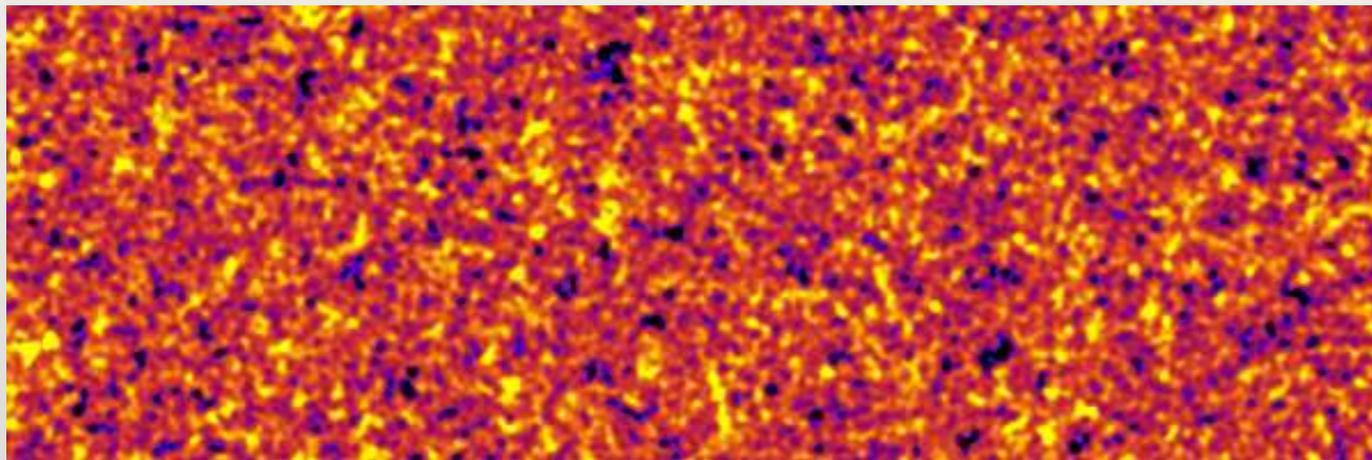
Alonso, Bull, Ferreira & Santos. ArXiv:1409.8667

## Signal à 21cm @ $z \sim 0.6$

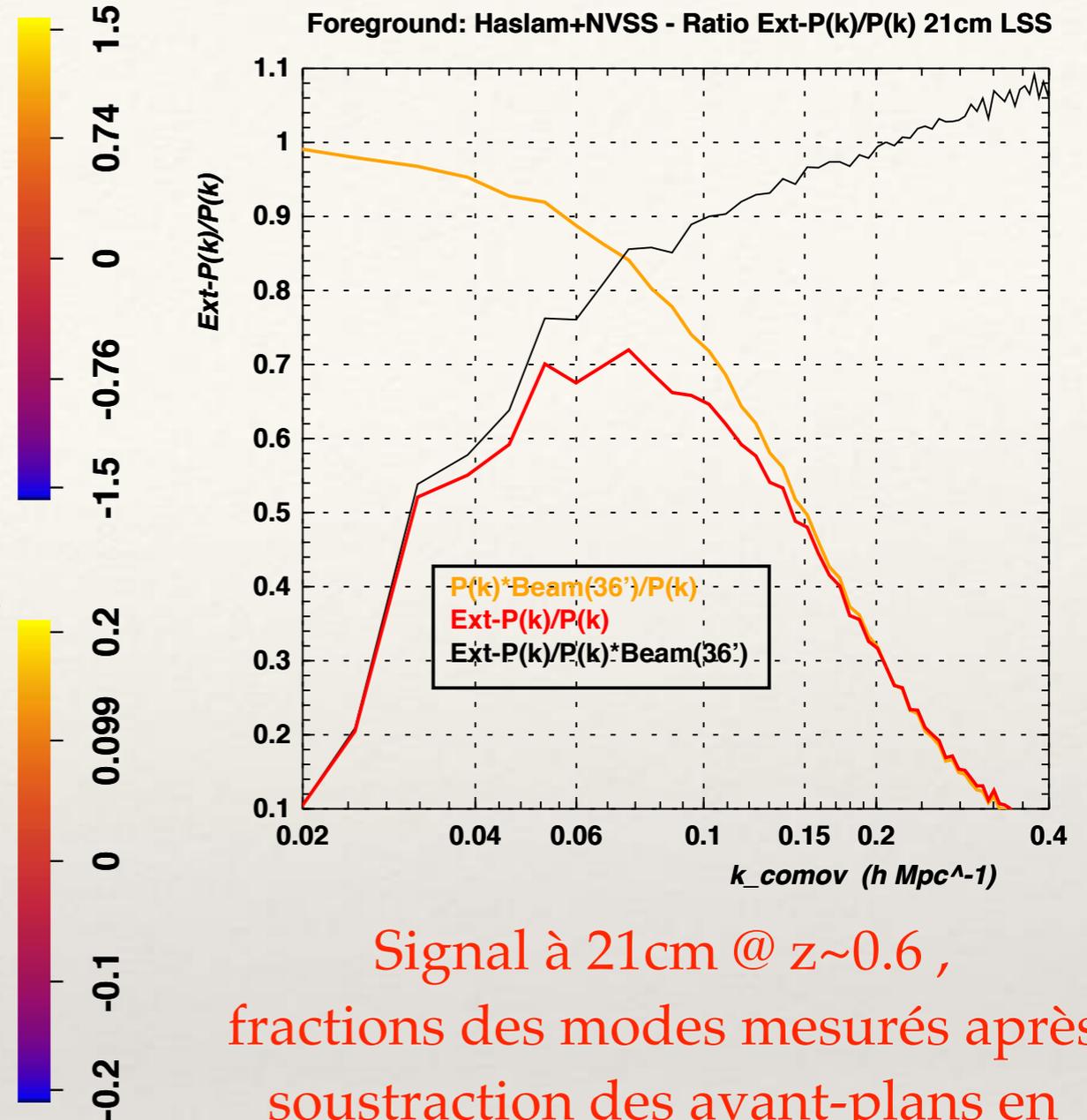


LSS-Map\*Lobe(25 arcmin) @ 884 MHz

## Signal 21cm après soustraction des avants-plans



ExtractedLSS Map @ 884 MHz (GSM)



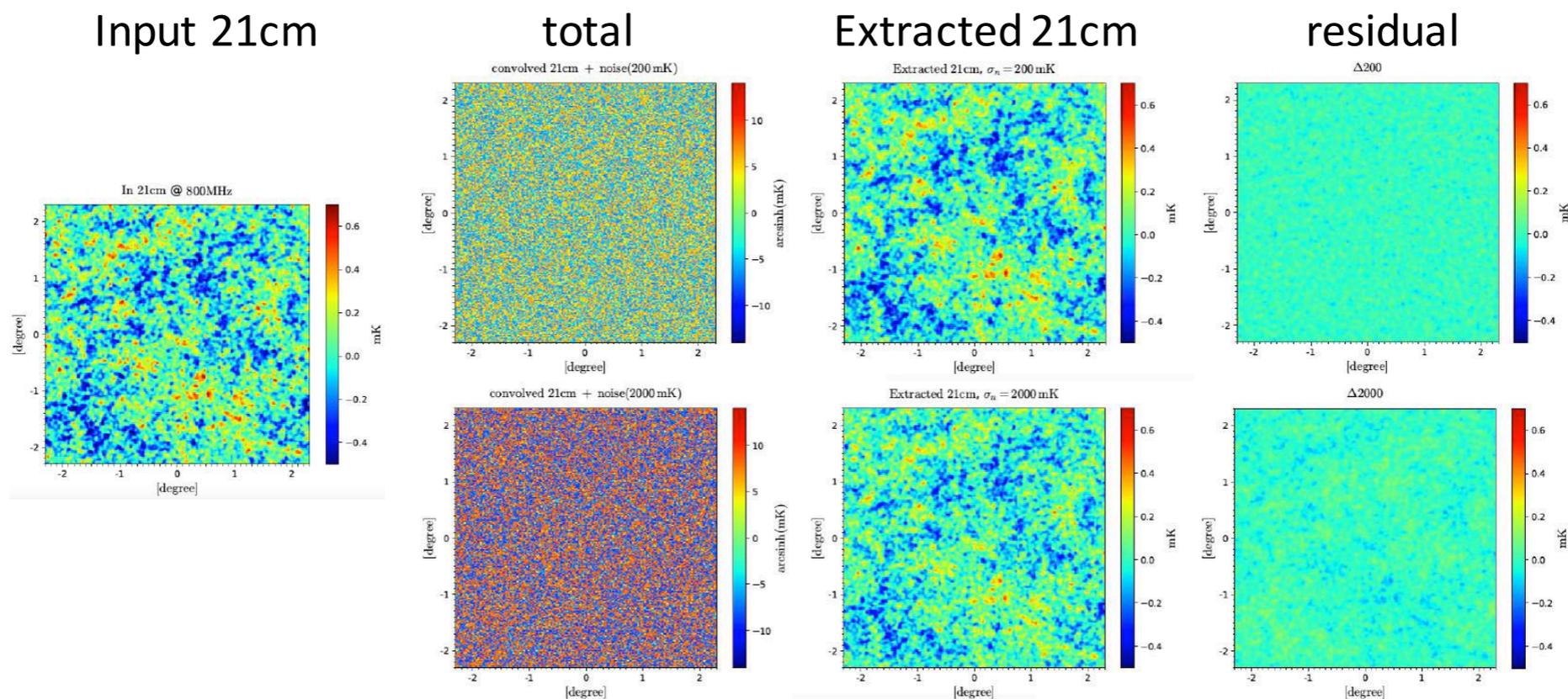
Signal à 21cm @  $z \sim 0.6$ ,  
fractions des modes mesurés après  
soustraction des avant-plans en  
fonction du nombre d'onde  $k$

Soustraction des émissions d'avant-plans en supposant que celles-ci suivent une loi de puissance (indice variable) - Ajustement de l'intensité et de l'indice spectral sur les observations, pour chaque direction. Prise en compte de la réponse instrumentale et du bruit ( $T_{sys}$ ) - Configuration instrumentale: réseau de  $11 \times 11 = 121$  réflecteurs

# Extraction du signal 21cm par Filtrage (Wiener) -I

- ❖ Application de deux filtres de Wiener en Cascade, selon l'axe longitudinal (fréquence,  $k_{\parallel}$ ) et ensuite, dans le plan transverse (angulaire,  $k_{\perp}$ )
- ❖ En fréquence ( $k_{\parallel}$ ) pour séparer les avant-plans (synchrotron, sources radio), à bas  $k_{\parallel}$  du [signal 21cm+bruit] à haut  $k_{\parallel}$
- ❖ Le second filtre, dans le plan transverse, permet de supprimer le bruit qui se trouve à haut  $k_{\perp}$

- Filtering in angular domain (2D)



# Extraction du signal 21cm par Filtrage (Wiener) -II

- Filtering in frequency domain

- 1D Wiener filter designed to remove the foreground:

$$\mathbf{W}_v^f = \mathbf{F} [\mathbf{F} + \mathbf{S} + \mathbf{N}]^{-1} \quad \text{The weight for each components}$$

- Extract the 21cm + noise:

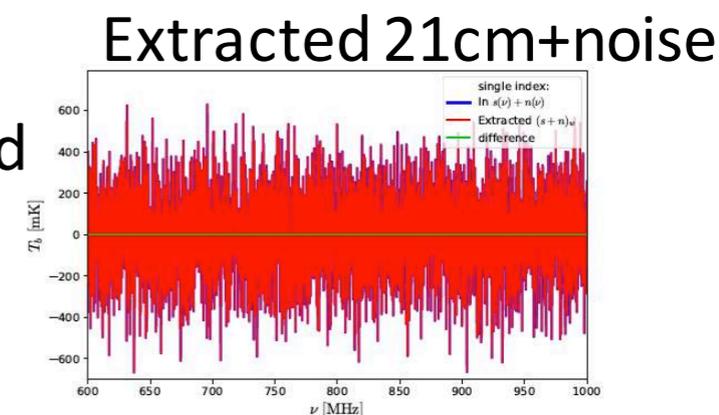
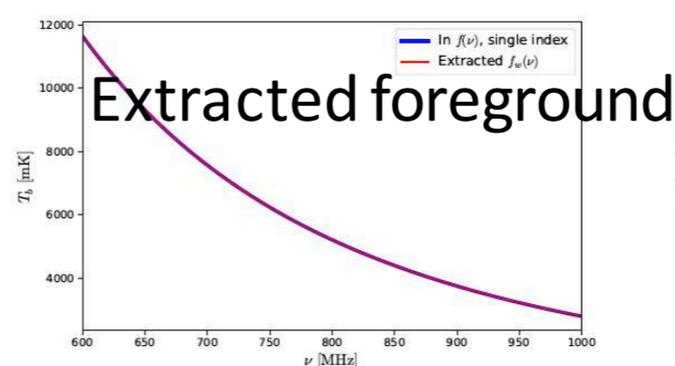
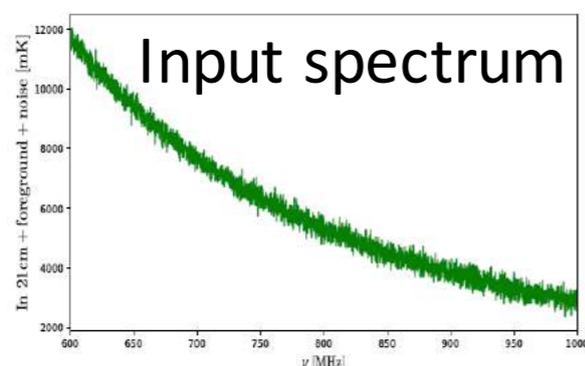
$$\mathbf{W}_v = \mathbf{I} - \mathbf{W}_v^f$$

- Filtering in angular domain

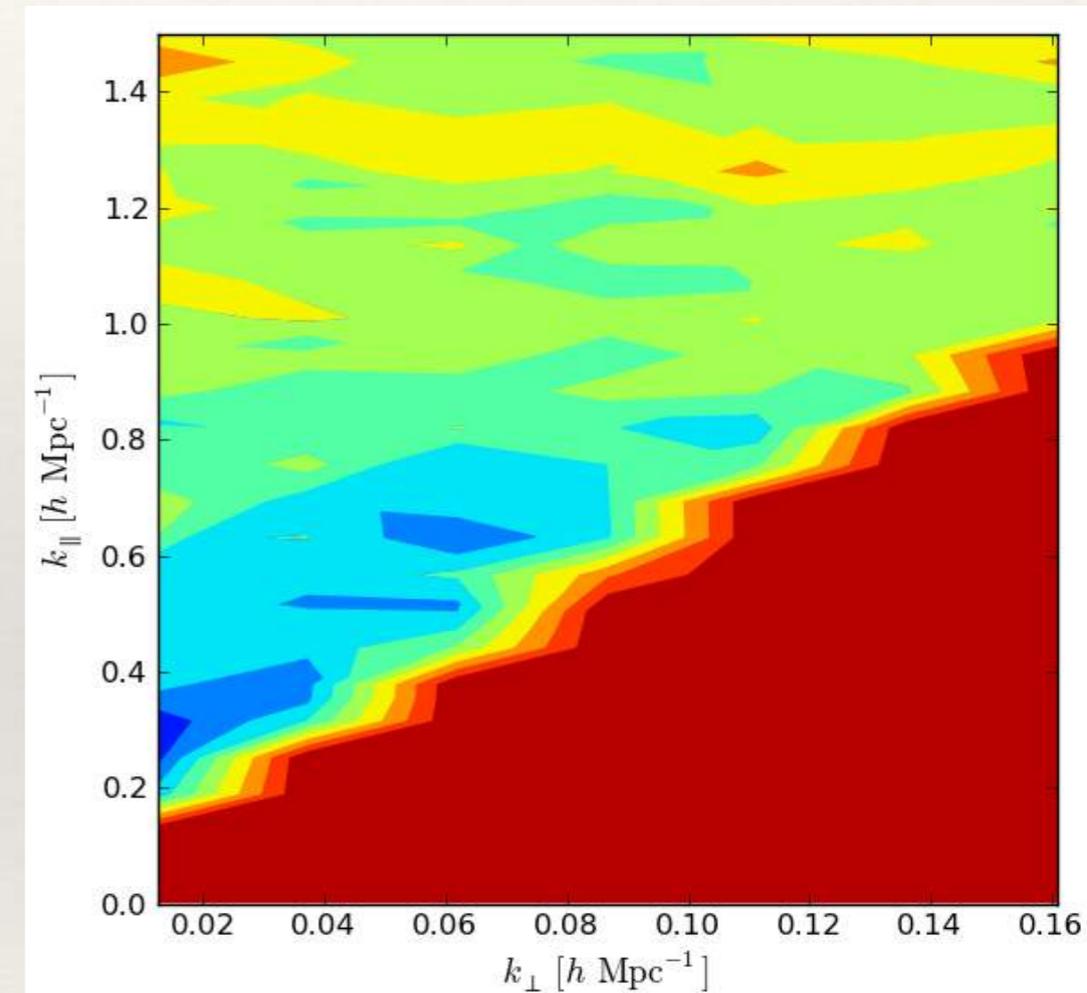
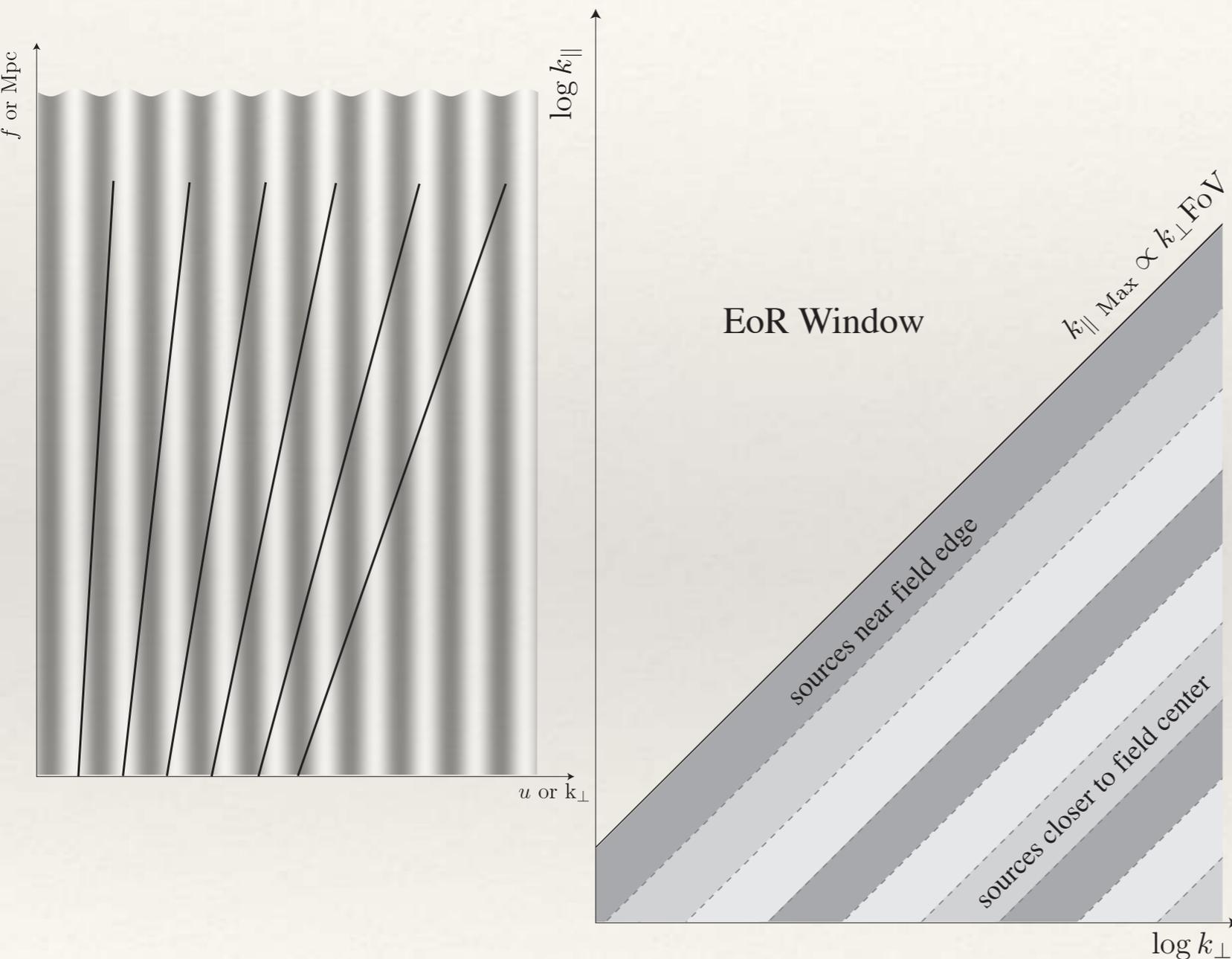
- 2D Wiener filter designed to extract the 21cm signal

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}y \equiv \mathbf{S}\mathbf{A}^T [\mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^T + \mathbf{N}]^{-1} y$$

- Filtering in frequency domain (1D)



# Foreground Wedge, EoR window



# Maximiser la séparation signal-avant-plans, recherche de la base de projection optimale

## Signal-to-Noise Eigenmodes

- Measurement  $\mathbf{v}$  is a combination of the sky  $\mathbf{a}$  and noise  $\mathbf{n}$

$$\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (1)$$

- Construct the covariances of the signal and foregrounds

$$\mathbf{S} = \mathbf{B} \langle \mathbf{a}_s \mathbf{a}_s^\dagger \rangle \mathbf{B}^\dagger, \quad \mathbf{F} = \mathbf{B} \langle \mathbf{a}_f \mathbf{a}_f^\dagger \rangle \mathbf{B}^\dagger \quad (2)$$

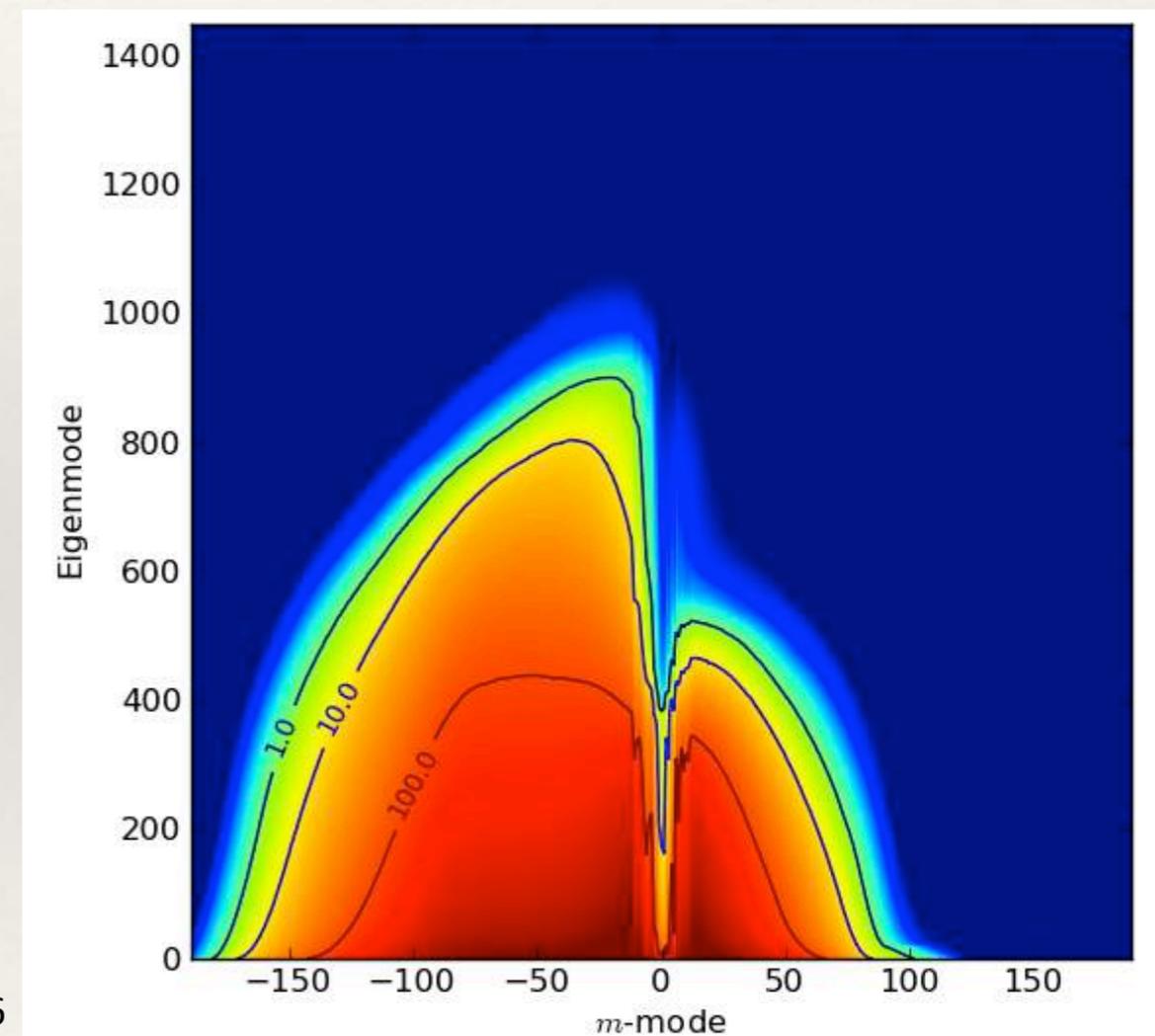
- Jointly diagonalise both matrices (eigenvalue problem)

Karhunen-Loève (KL) Transform:  $\mathbf{S}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{F}\mathbf{x} \quad (3)$

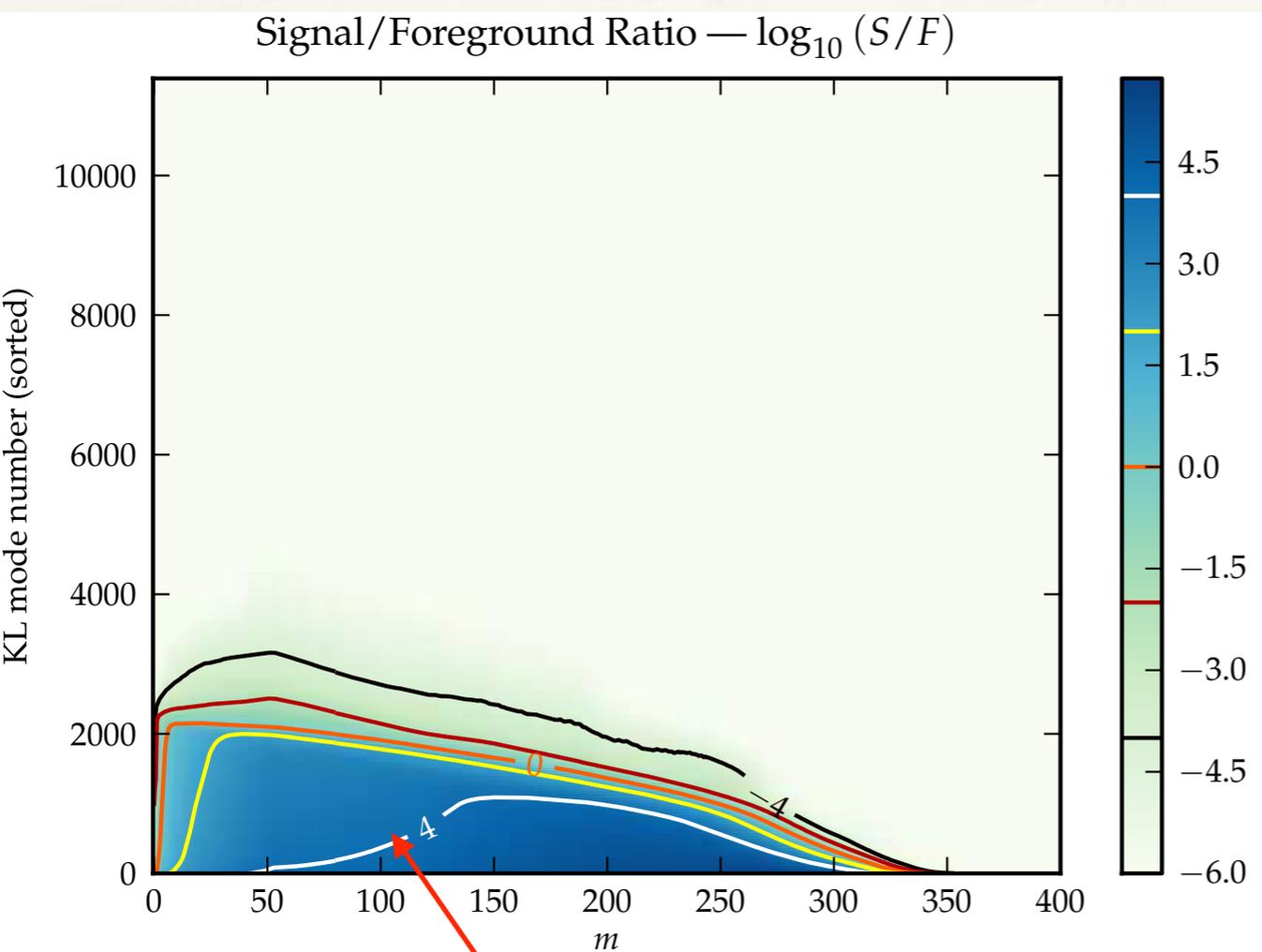
- Gives a new basis, where we expect that all modes are uncorrelated. Eigenvalue  $\lambda_i$  gives ratio of signal to foreground variance for mode  $i$ .

cf. Bond 1994, Vogelej and Szalay 1996

## Signal/Foreground Spectrum

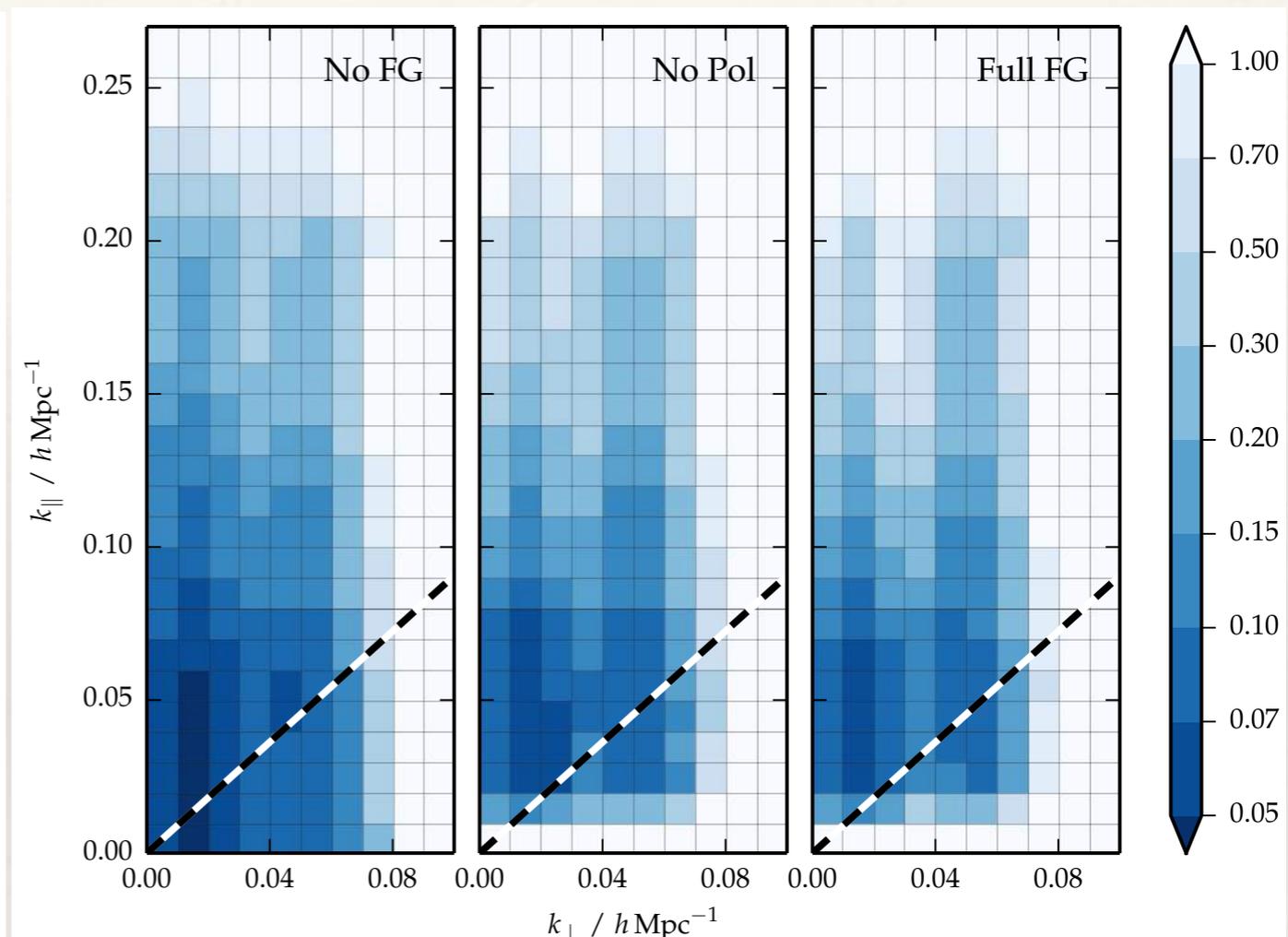


# Modes « propres » en rapport signal/bruit



Dominé par les avant-plans

Shaw et al. 2014, arXiv:1302.0327

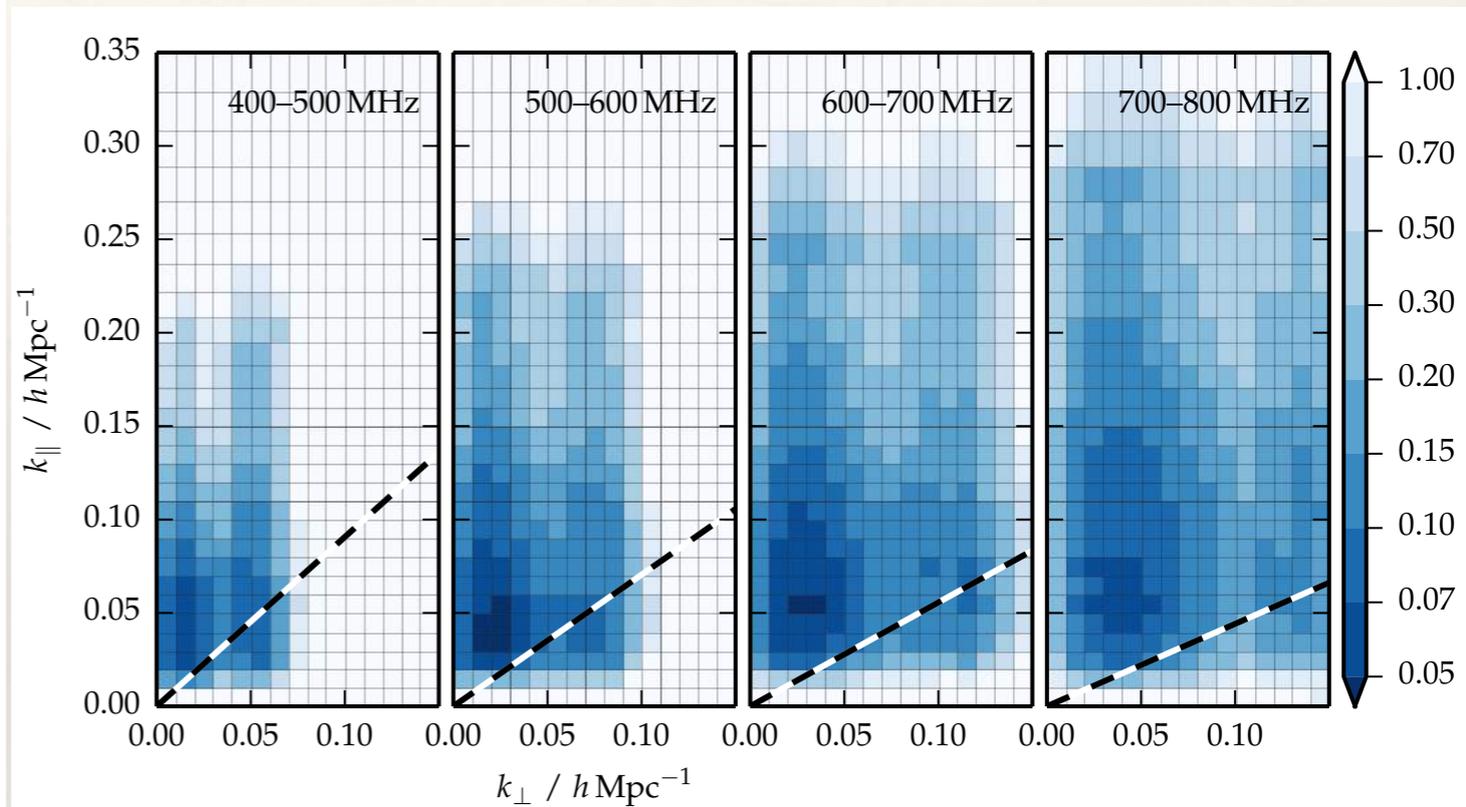
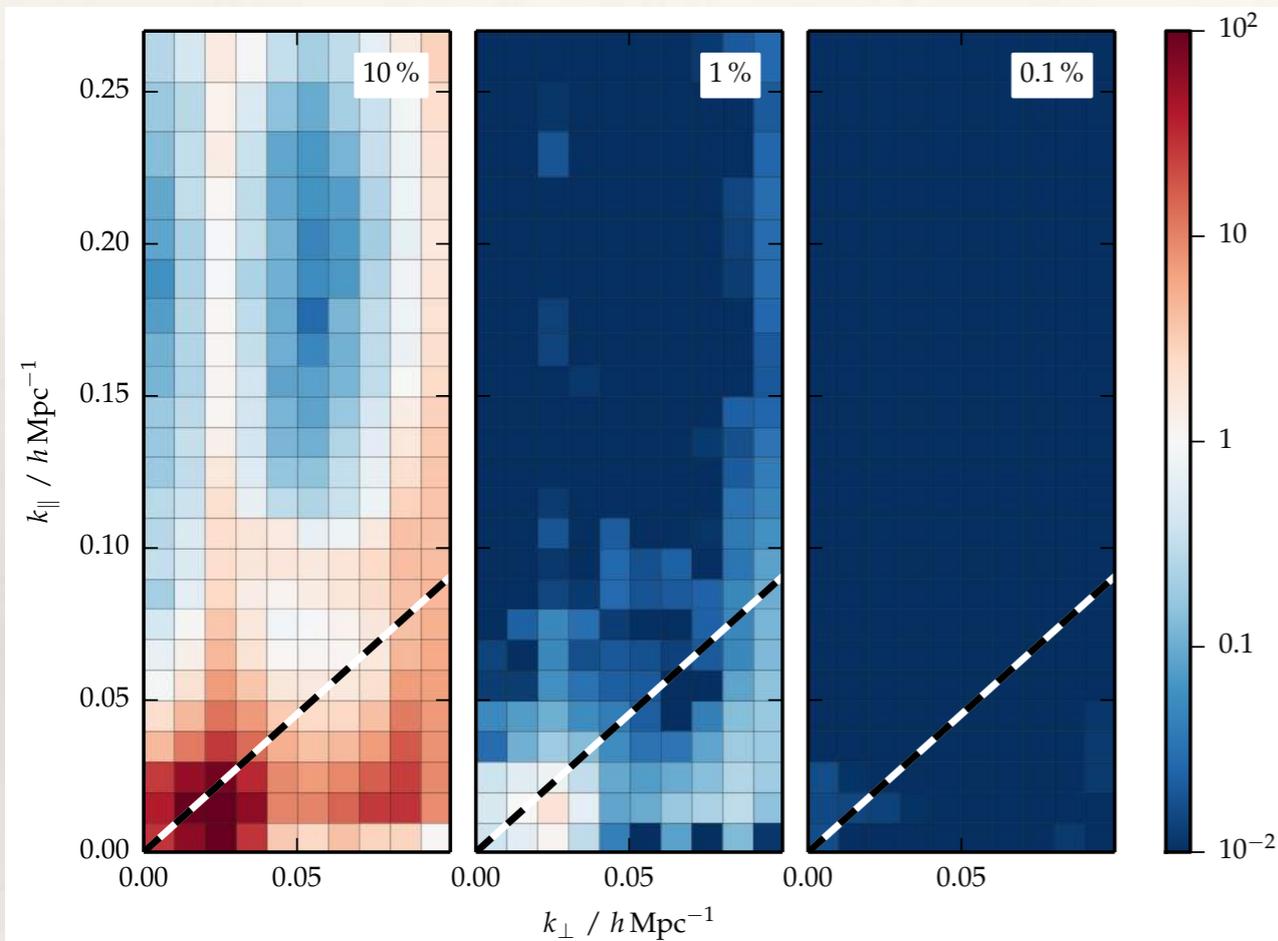


rapport S/B ds le plan  $(k_{\perp}, k_{\parallel})$  pour 3 cas  
(sans avant-plan, avec, +polar)

Prise en compte de la polarisation

Shaw et al. 2015, arXiv:1401.2095

# Imperfections instrumentales



Effet systématique dû aux erreurs  
sur les gains complexes

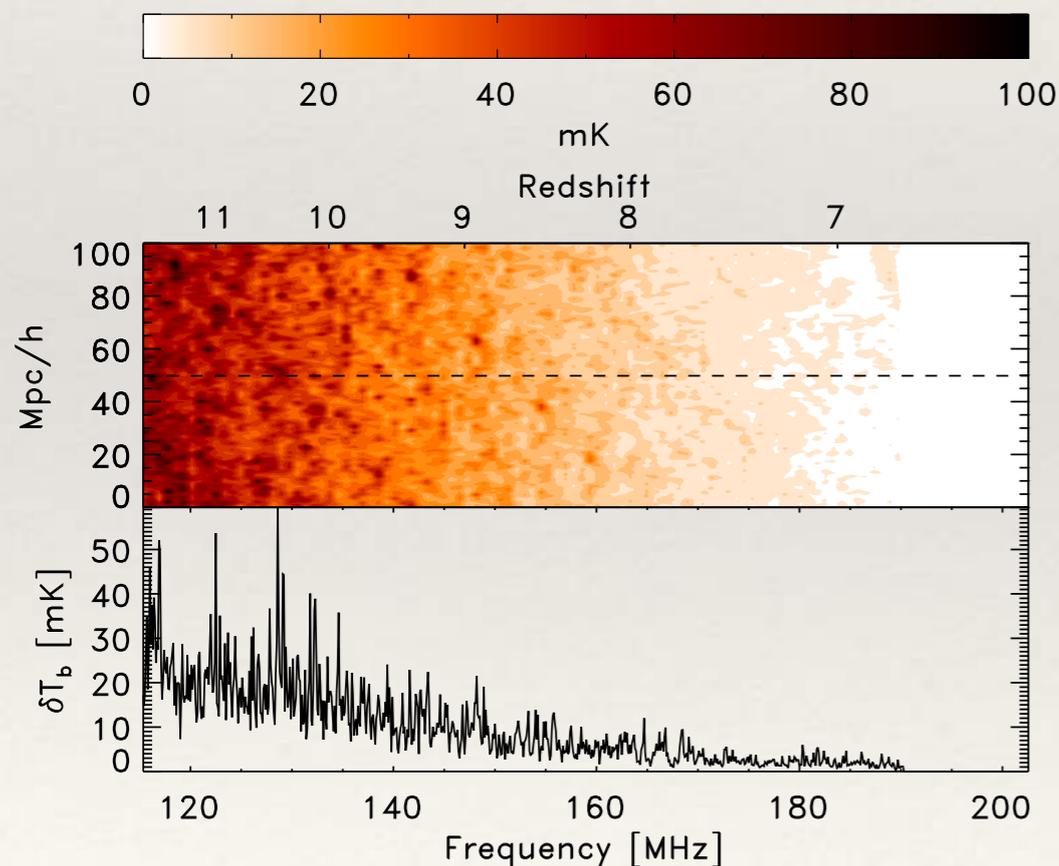
Gain avec la résolution instrumentale

# EoR signal & foregrounds

## Foreground simulations for the LOFAR - Epoch of Reionization

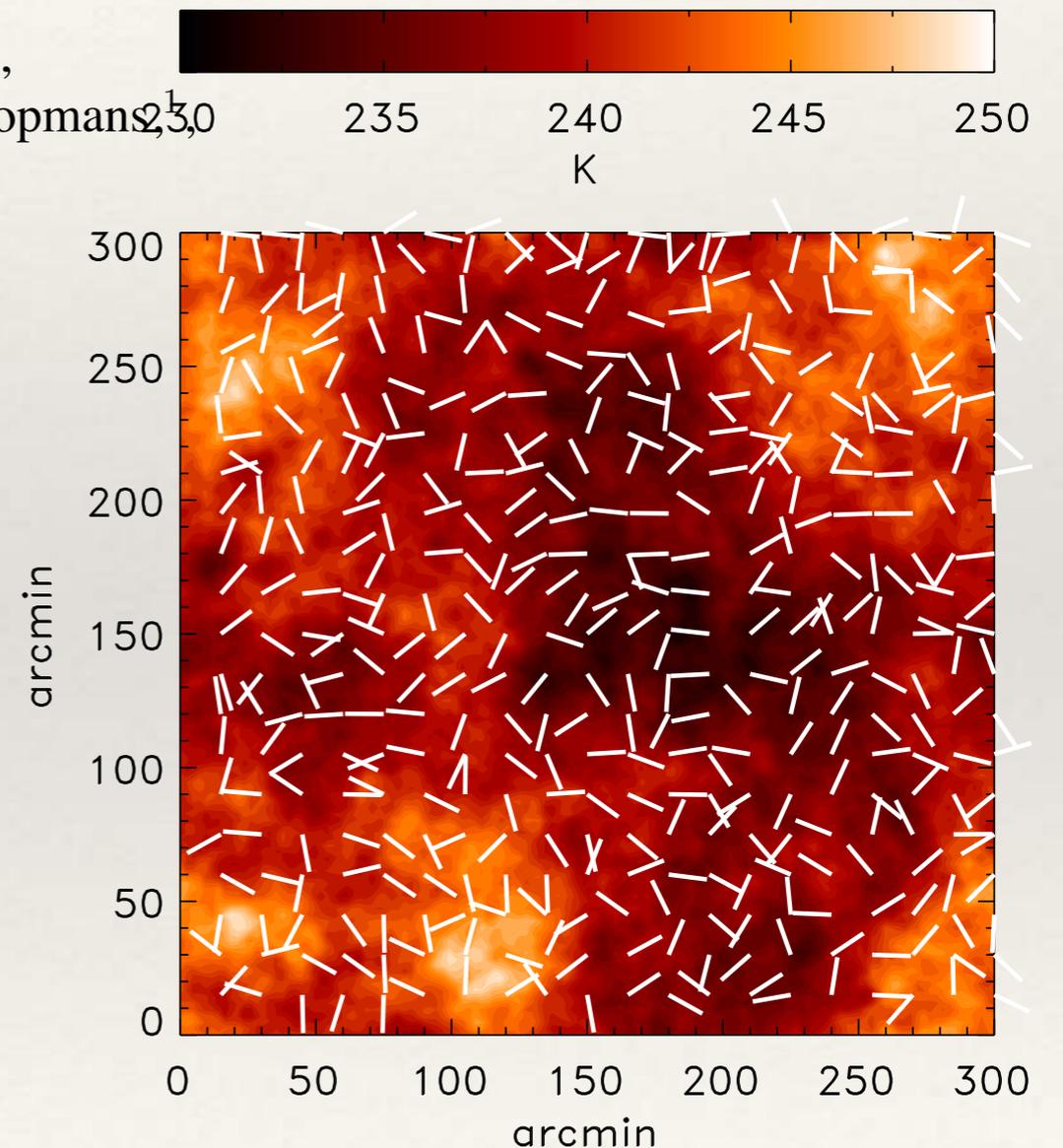
### Experiment

V. Jelić<sup>1\*</sup>, S. Zaroubi<sup>1</sup>, P. Labropoulos<sup>1</sup>, R.M. Thomas<sup>1</sup>, G. Bernardi<sup>1</sup>,  
M.A. Brentjens<sup>2</sup>, A.G. de Bruyn<sup>1,2</sup>, B. Ciardi<sup>3</sup>, G. Harker<sup>1</sup>, L.V.E. Koopmans<sup>2,3,0</sup>,  
V.N. Pandey<sup>1</sup>, J. Schaye<sup>4</sup>, S. Yatawatta<sup>1</sup>



Signal EoR

Jelic et al. 2008, arXiv:0804.1130



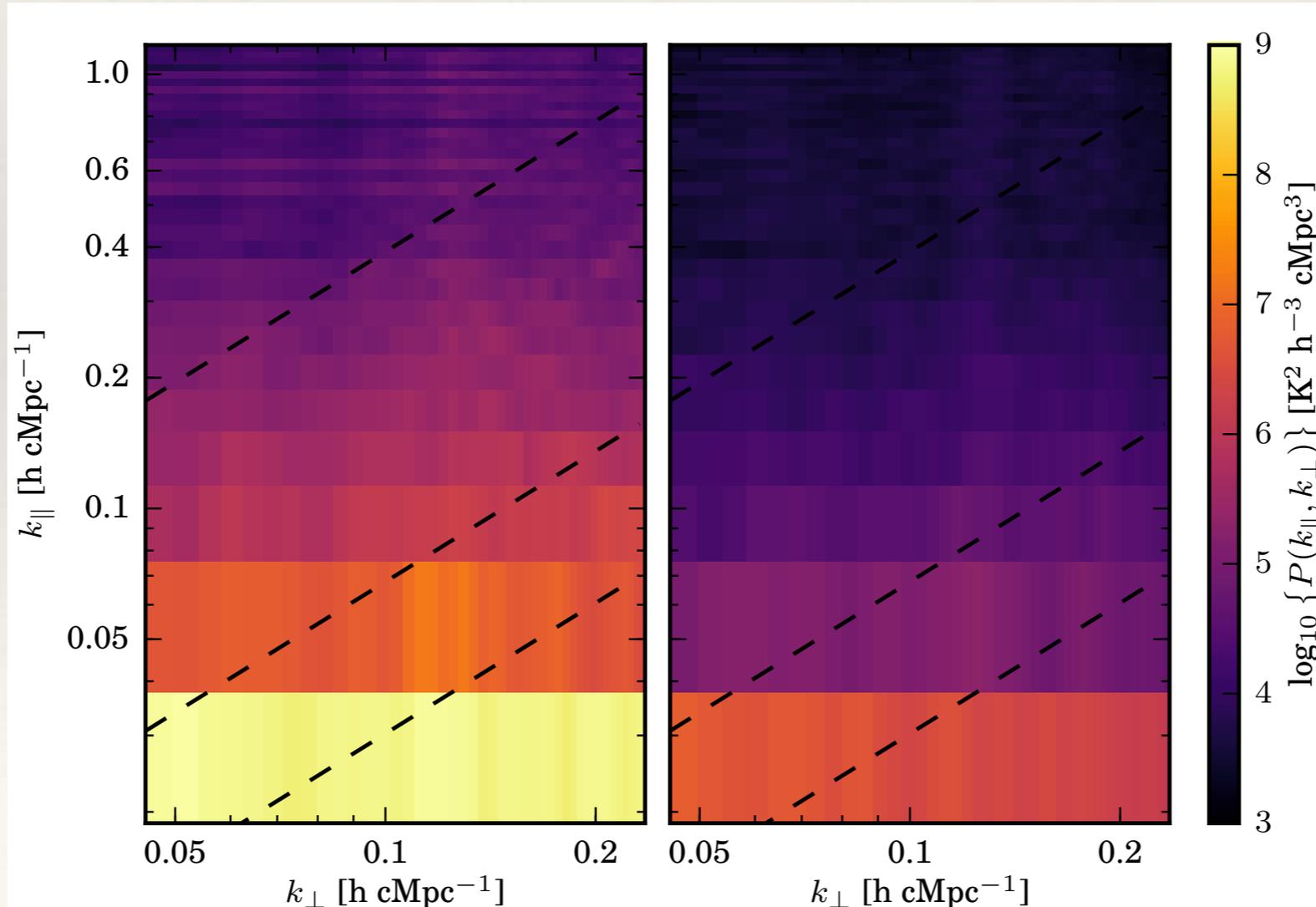
**Figure 7.** Simulated 120 MHz map of polarized intensity ( $I_p$ ) of diffuse Galactic synchrotron emission, and polarization angle (white lines). The angular size of the map is  $5^\circ \times 5^\circ$ , with  $\sim 0.6'$  resolution.

# UPPER LIMITS ON THE 21-CM EPOCH OF REIONIZATION POWER SPECTRUM FROM ONE NIGHT WITH LOFAR

A.H. PATIL<sup>1</sup>, S. YATAWATTA<sup>1,2</sup>, L.V.E. KOOPMANS<sup>1,†</sup>, A.G. DE BRUYN<sup>2,1</sup>, M. A. BRENTJENS<sup>2</sup>, S. ZAROUBI<sup>1,11</sup>, K. M. B. ASAD<sup>1</sup>, M. HATEF<sup>1</sup>, V. JELIĆ<sup>1,8,2</sup>, M. MEVIUS<sup>1,2</sup>, A. R. OFFRINGA<sup>2</sup>, V.N. PANDEY<sup>1</sup>, H. VEDANTHAM<sup>9,1</sup>, F. B. ABDALLA<sup>7,13</sup>, W. N. BROUW<sup>1</sup>, E. CHAPMAN<sup>7</sup>, B. CIARDI<sup>4</sup>, B. K. GEHLOT<sup>1</sup>, A. GHOSH<sup>1</sup>, G. HARKER<sup>3,7,1</sup>, I. T. ILIEV<sup>10</sup>, K. KAKIICHI<sup>4</sup>, S. MAJUMDAR<sup>12</sup>, M. B. SILVA<sup>1</sup>, G. MELLEMA<sup>5</sup>, J. SCHAYE<sup>6</sup>, D. VRBANEC<sup>4</sup>, S. J. WIJNHOLDS<sup>2</sup>

We present the first limits on the Epoch of Reionization (EoR) 21-cm HI power spectra, in the redshift range  $z = 7.9 - 10.6$ , using the Low-Frequency Array (LOFAR) High-Band Antenna (HBA). In total 13.0 h of data were used from observations centred on the North Celestial Pole (NCP). After subtraction of the sky model and the noise bias, we detect a non-zero  $\Delta_{\Gamma}^2 = (56 \pm 13 \text{ mK})^2$  ( $1-\sigma$ ) excess variance and a best  $2-\sigma$  upper limit of  $\Delta_{21}^2 < (79.6 \text{ mK})^2$  at  $k = 0.053 h \text{ cMpc}^{-1}$  in the range  $z = 9.6 - 10.6$ . The excess variance decreases when optimizing the smoothness of the direction- and frequency-dependent gain calibration, and with increasing the completeness of the sky model. It is likely caused by (i) residual side-lobe noise on calibration baselines, (ii) leverage due to non-linear effects, (iii) noise and ionosphere-induced gain errors, or a combination thereof. Further analyses of the excess variance will be discussed in forthcoming publications.

Patil et al. 2017, arXiv:1702.08679



Avant (gauche)  
après (droite)  
calibration DD

De belles perspectives avec  
LOFAR, HERA, SKA  
pour le sondage de l'Époque de Réionisation

Peut-être aussi une fenêtre complémentaire pour la  
cosmologie/Energie noire, avec CHIME, Tianlai,  
HIRAX, et peut-être PUMA

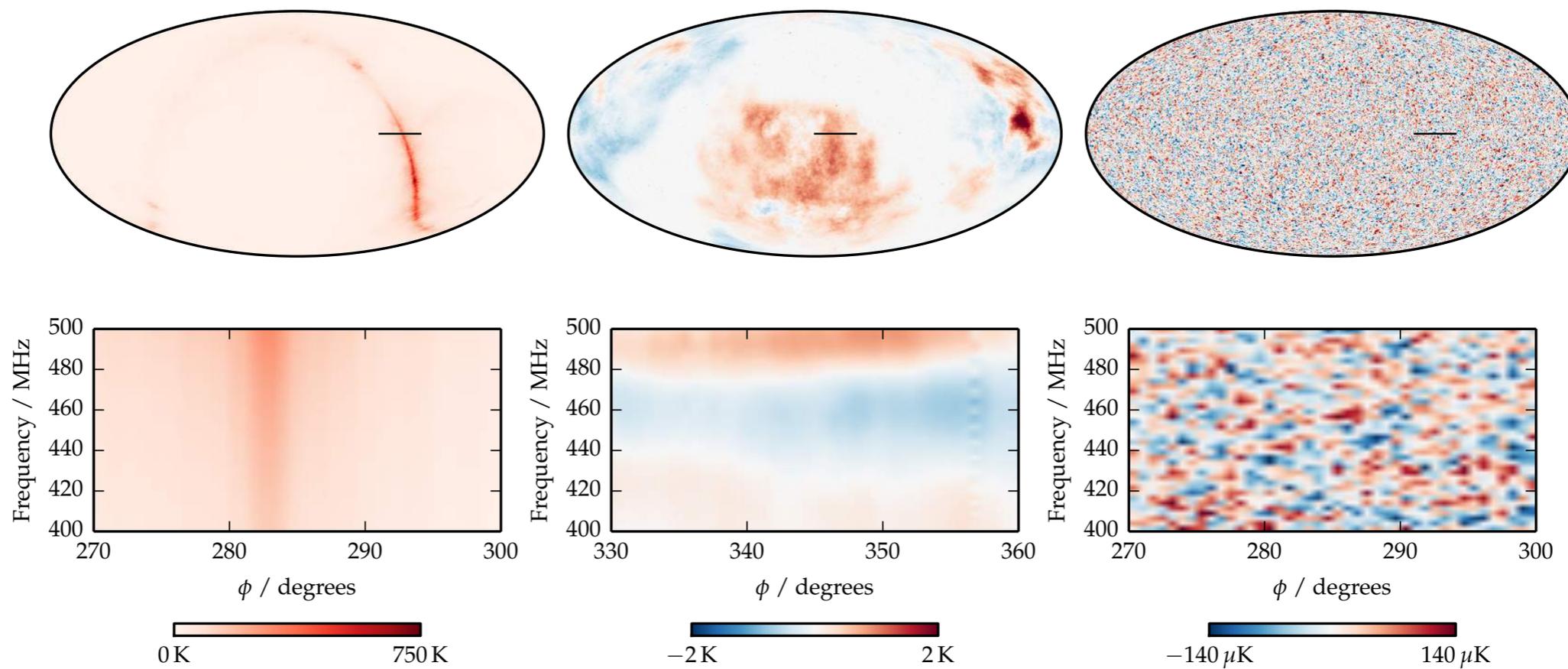
Merci de votre attention

Unpolarised Foreground

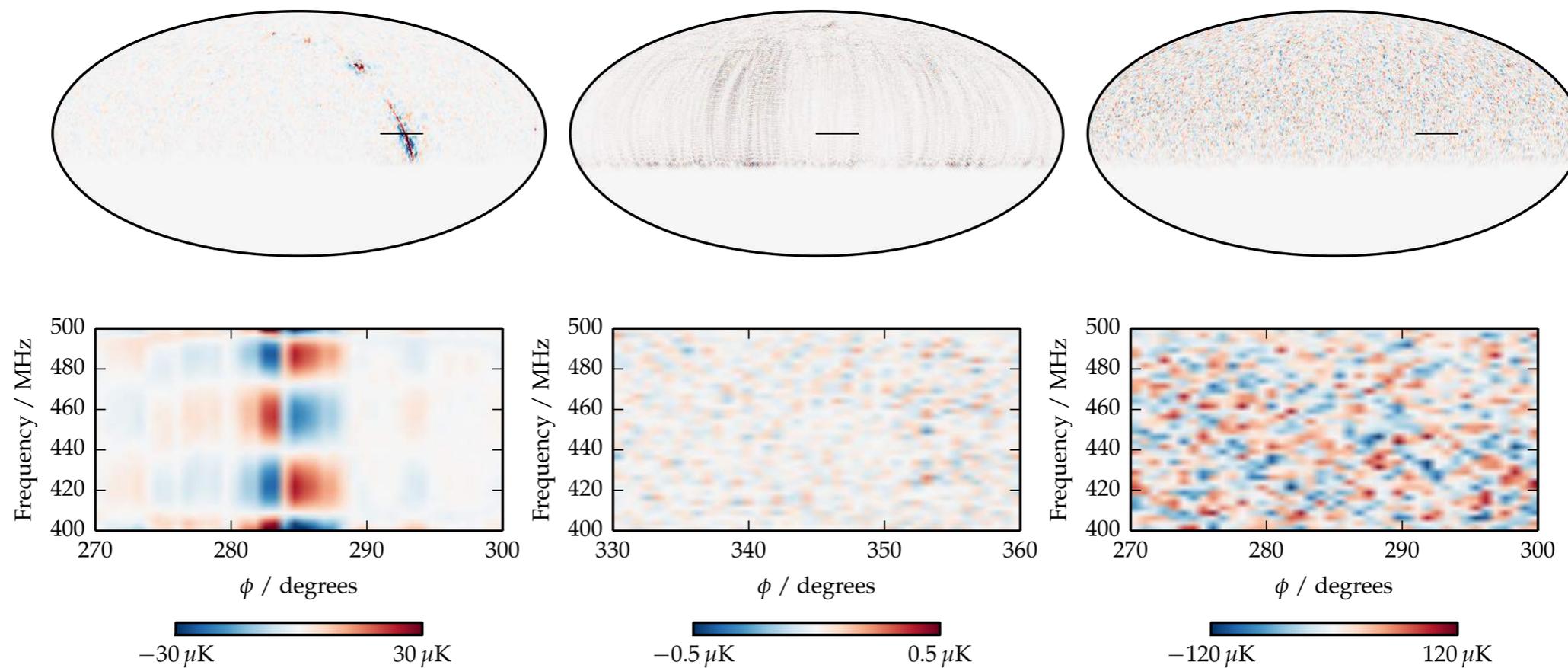
Polarised Foreground (Q)

21cm Signal

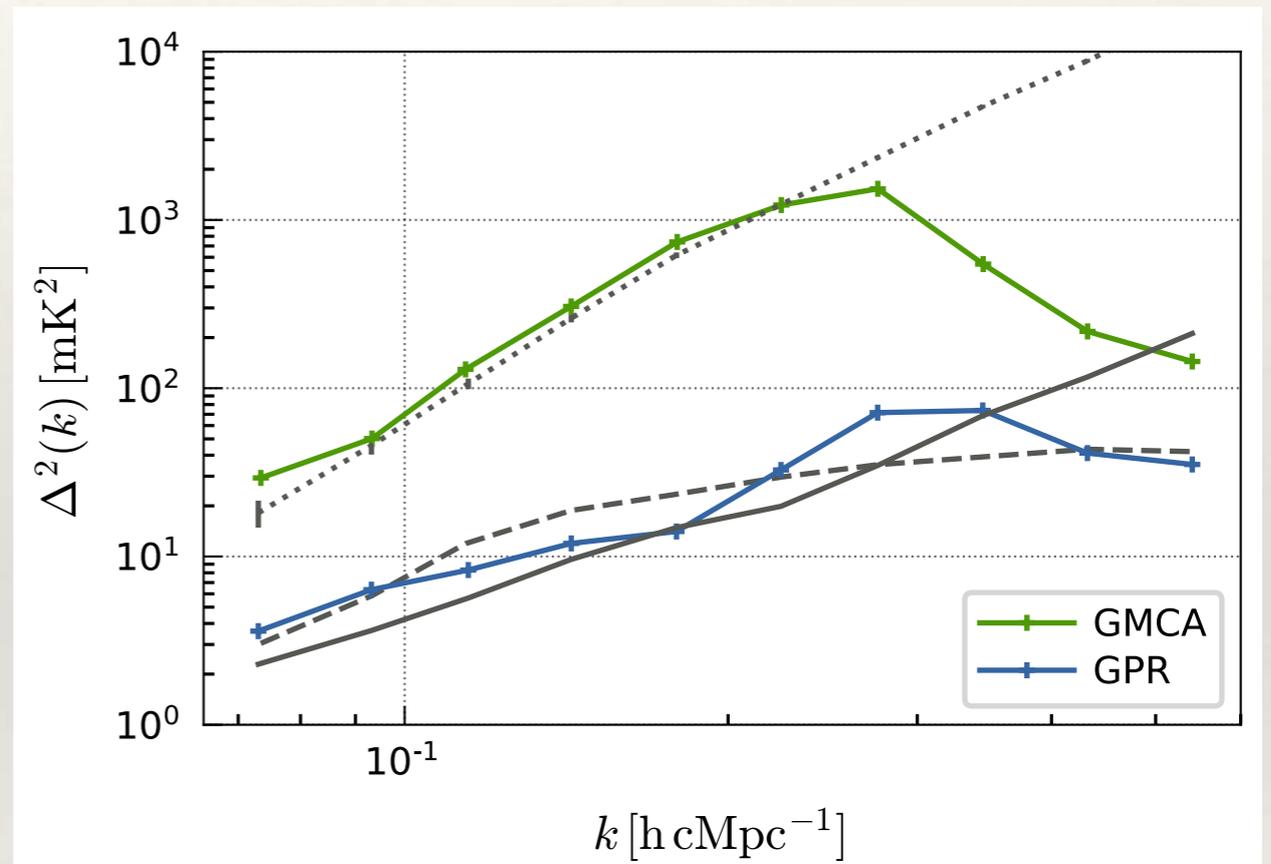
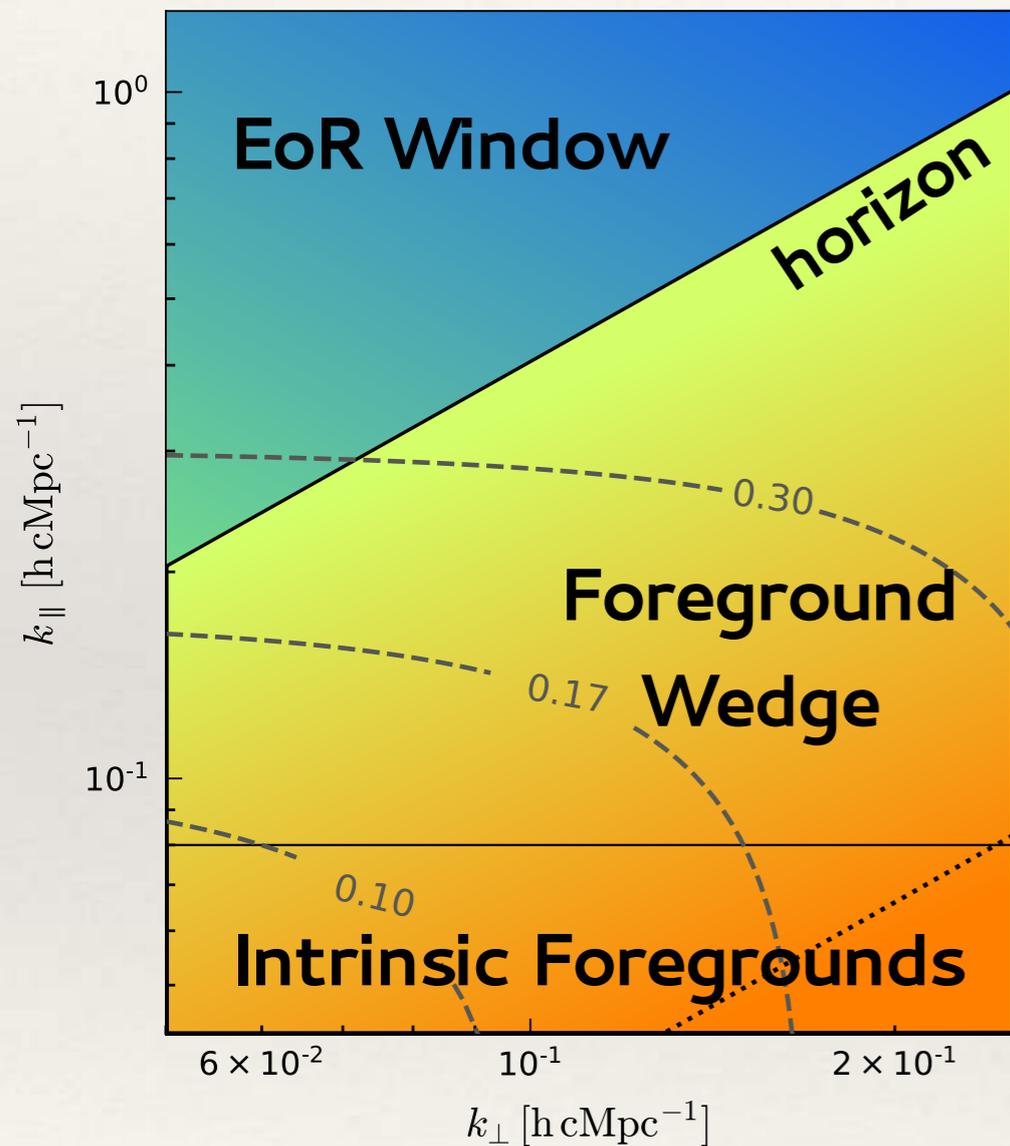
Simulated Sky

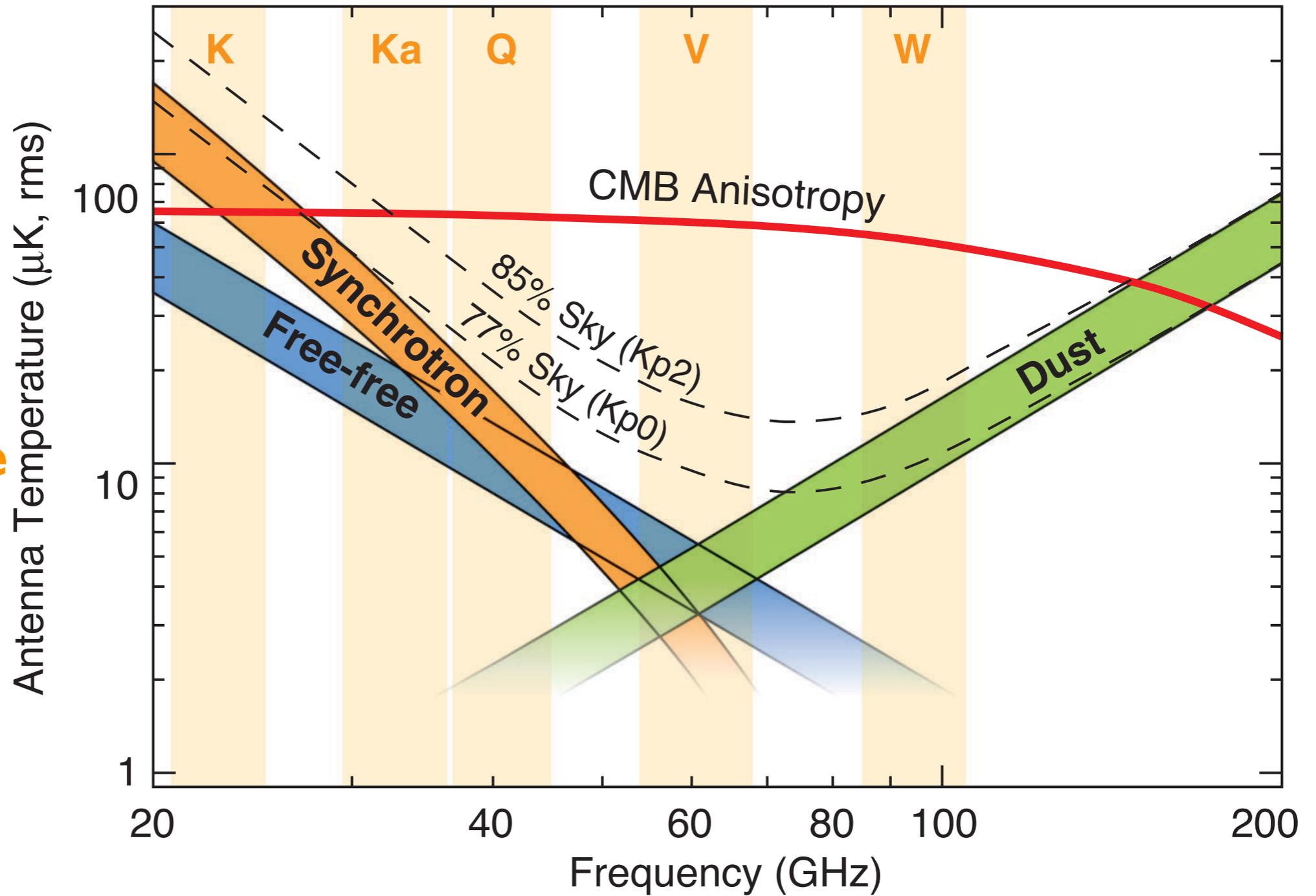


Foreground Filtered



# EoR signal & foregrounds





+ les sources radio à spectre large (AGN, quasar ...)

← GHz

# Spectre des anisotropies des avant-plans

**Bennet et al 2003, ApJS 148**