



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 21cm
Extraire le signal par filtrage

Réza Ansari

Univ. Paris-Sud & LAL/CNRS-IN2P3

Séminaire au Collège de France

9 décembre 2019

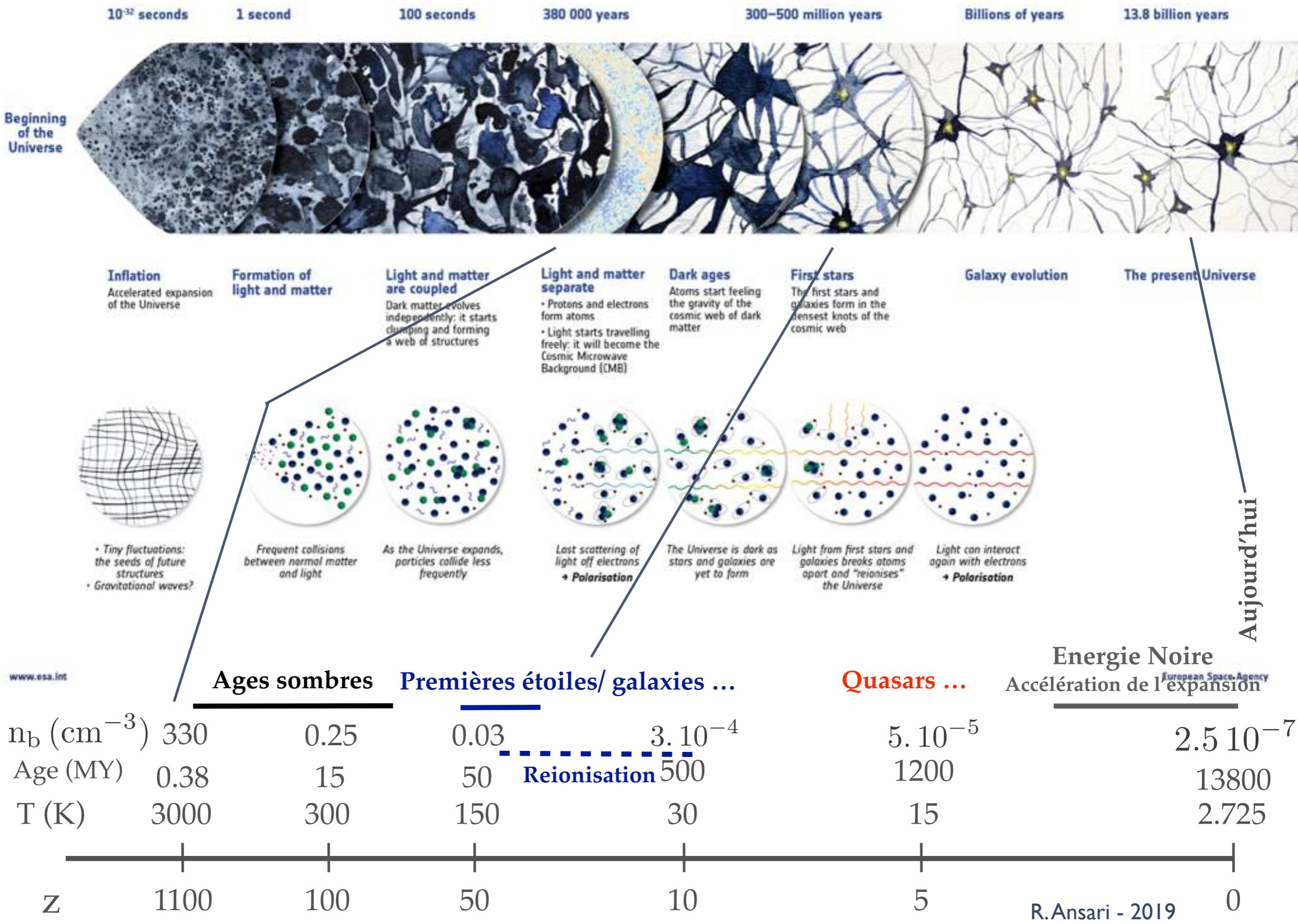
- ❖ Observation du HI extragalactique à 21cm
 - ❖ Motivations
 - ❖ défis scientifiques et techniques
- ❖ Des observations aux paramètres physiques
 - ❖ Formulation du problème
 - ❖ Approche Bayésienne , Filtrage
- ❖ Extraction du signal 21 cm cosmologique à partir des observations
 - ❖ Interférométrie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

Le signal à 21cm 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**



le modèle cosmologique Λ CDM et ses 6 paramètres (Planck+)

3 parameters to set (through 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

Θ Sound horizon size when optical depth τ reaches unity

(Distance traveled by a sound wave since inflation, when universe became transparent at recombination at $t \sim 380\ 000$ years)

τ 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

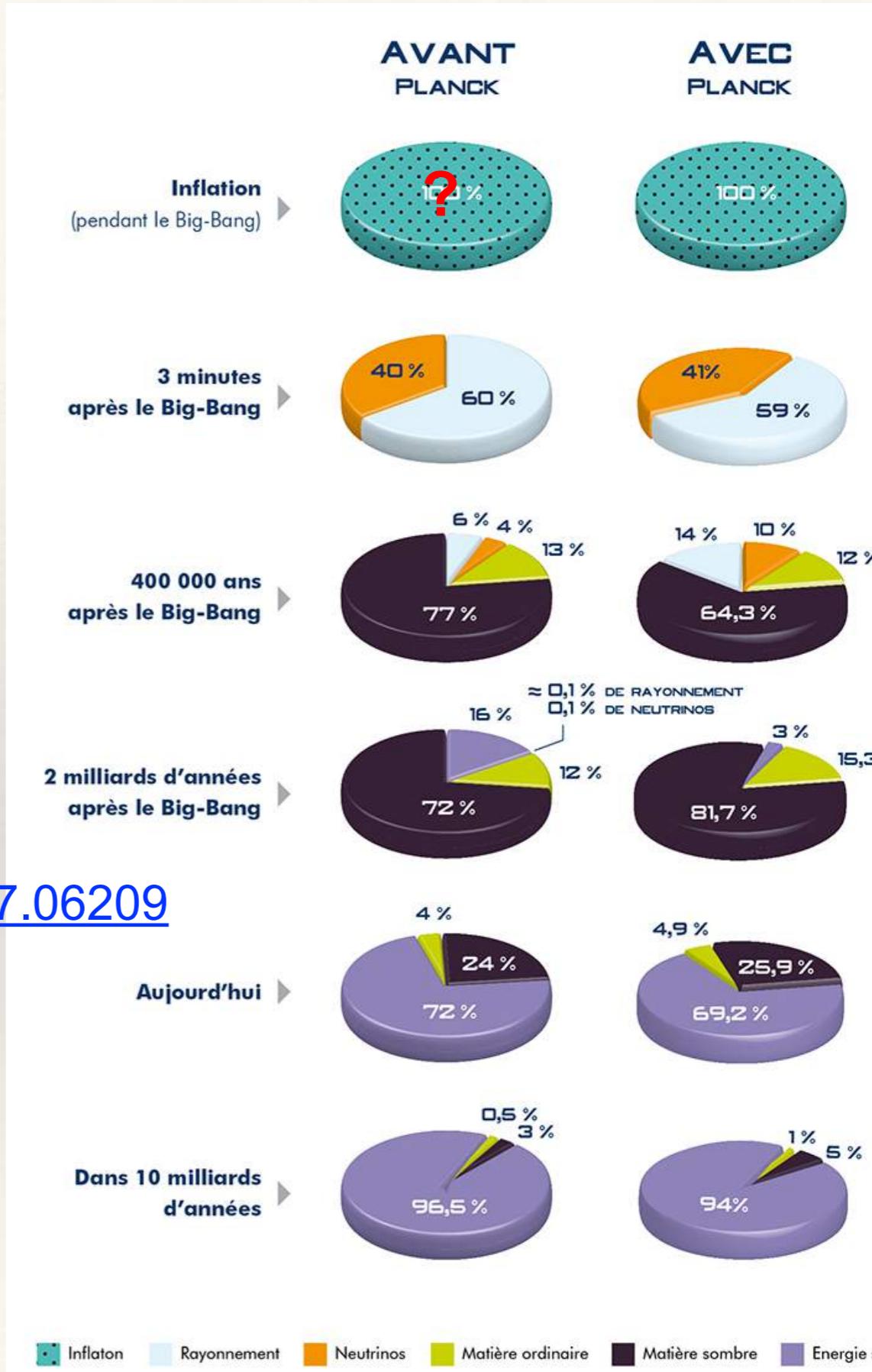
- Ω "Dark Energy" fraction of the critical density (derived only if assumed flat)

- H_0 the expansion rate today (in km/s per Mpc of separation)

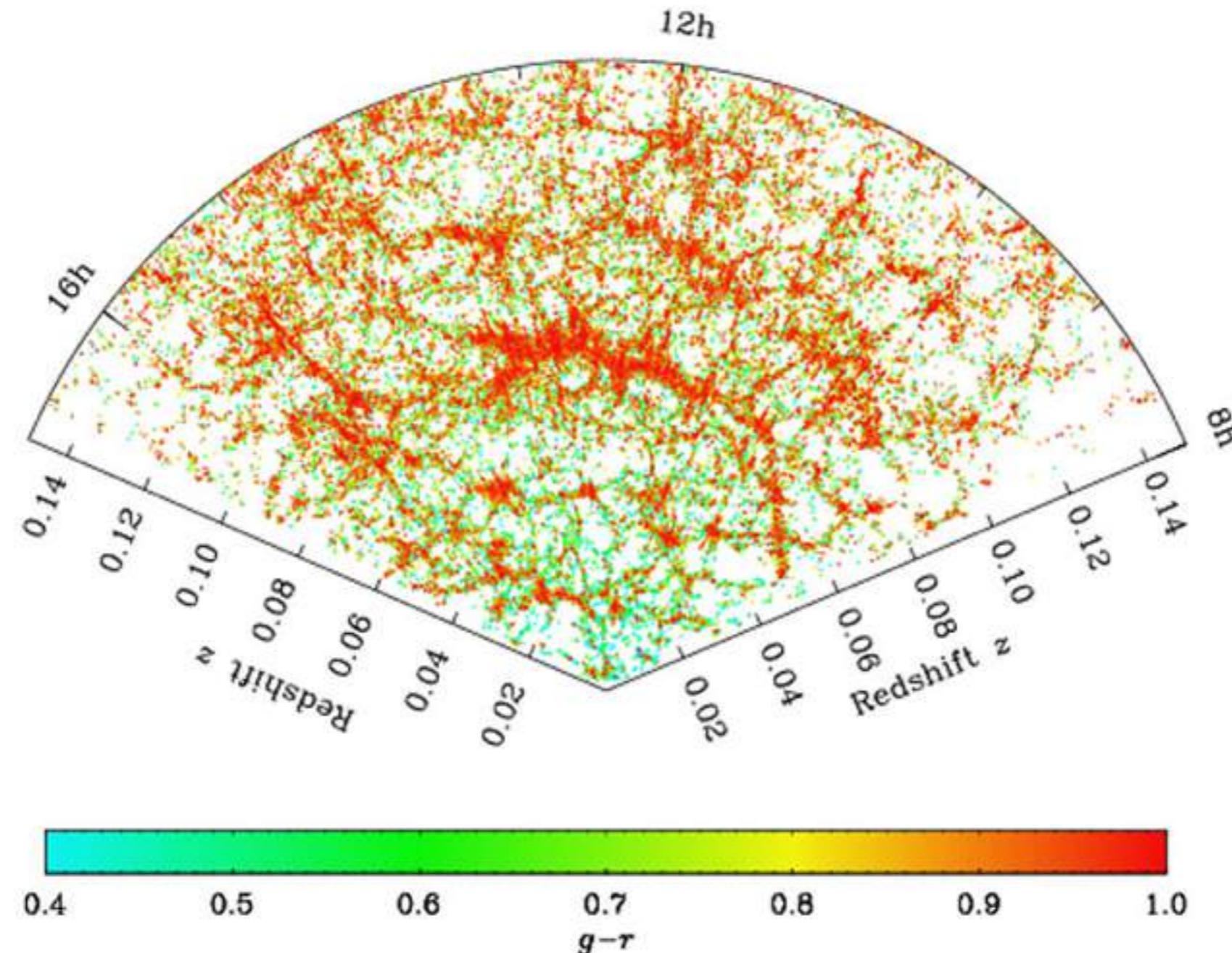
- t_0 the age of the universe (in Gy)

[Planck 2018, arXiv:1807.06209](#)

La nature de la matière noire (5 fois plus abondante que la matière ordinaire) et celle de l'énergie noire (ou Λ , 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 ~ 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 21cm 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 $\sim 0.3 \dots 0.7 \times$ Mgaz
- ❖ Puissance émise $\approx 3 \cdot 10^{18} \text{ W} \times (\text{M}_{\text{HI}}/\text{M}_{\text{sol}})$ (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 $\approx 0.05 \text{ Gal / Mpc}^3$ avec $\text{M}_{\text{HI}} > 10^9 \text{ M}_{\text{sol}}$,
 $\approx 0.01 \text{ Gal / Mpc}^3$ avec $\text{M}_{\text{HI}} > 10^{10}$

Une galaxie à $z=0.3$, $D_L = 1500 \text{ Mpc}$

❖ Emission Radio à 21 cm

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

❖ En optique

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

Observer les galaxies à 21cm à des distances cosmologiques

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

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

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

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

S_{21} en μJy pour $M_{H_I} = 10^{10} M_\odot$

A (m^2)	Tsys (K)	Slim
5000	50	66
5000	25	33
100000	50	3,5
100000	25	1,7

z	S21 (μJy)
0,25	175
0,5	40
1	9,6
1,5	3,5
2	2,5

> 100 000 m^2 → SKA !



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)



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

Résolution 3-20 arcmin

Sensibilité ~ mJy

Table B.1 Comparison of major blind HI surveys

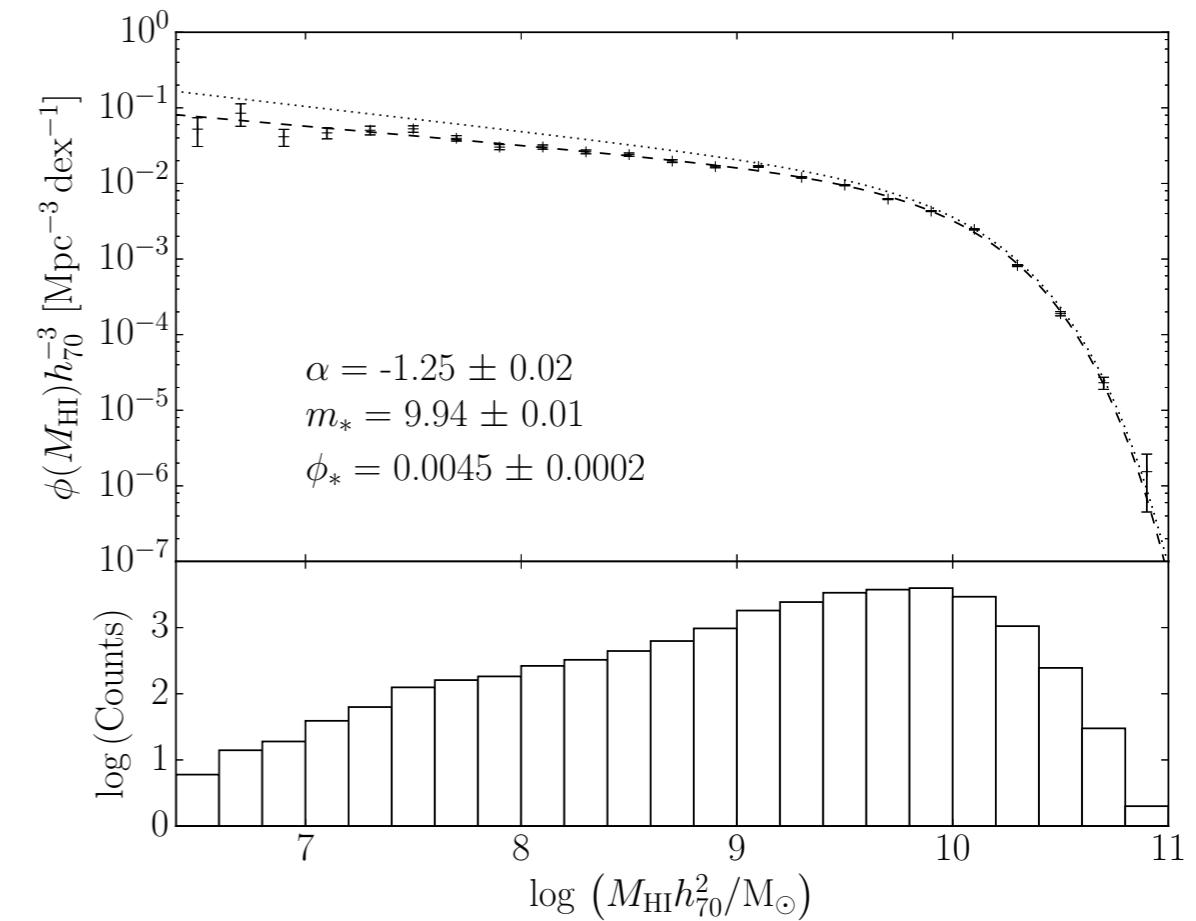
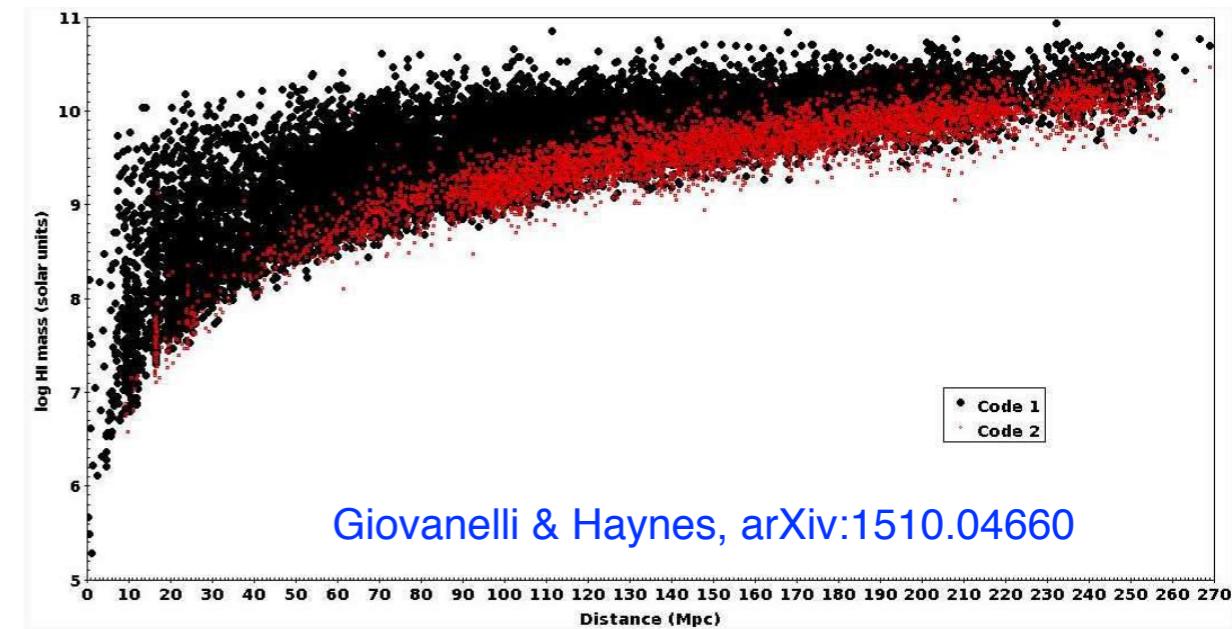
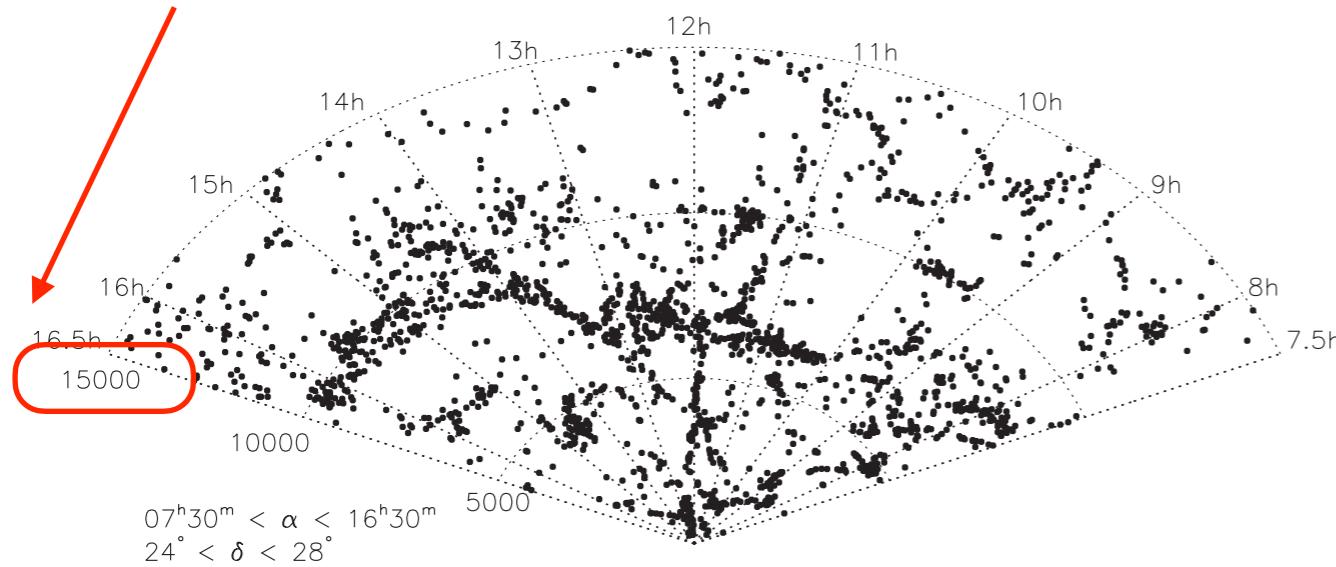
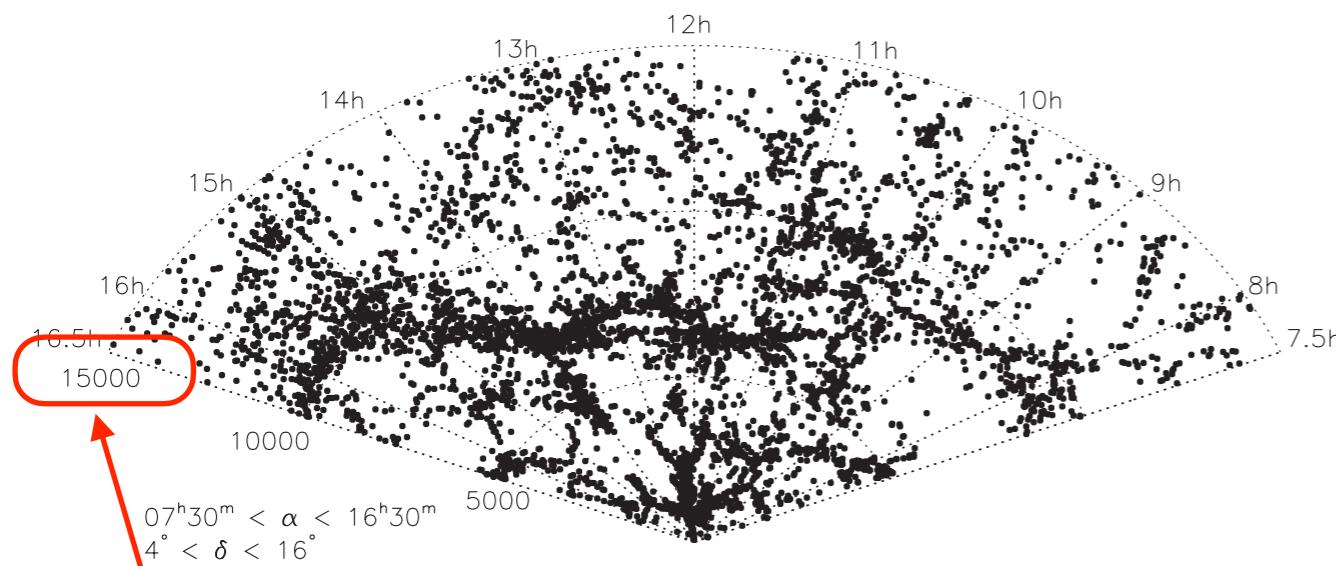
Survey	Area (deg ²)	Beam (arcmin)	V _{max} (km/s)	V _{res} ^a (km/s)	t _s (s)	rms ^b (mJy)	N _{det}	min M _{HI} ^c (M _{sun})	Ref
AHISS	65	3.3	-700 - 7400	16	var	0.7	65	1.9x10 ⁶	1
ADBS	430	3.3	-650 - 7980	34	12	3.6	265	9.9x10 ⁶	2
WSRT	1800	49.	-1000 - 6500	17	60	18	155	4.9x10 ⁷	3
Nancay CVn	800	4 x 20	-350 - 2350	10	80	7.5	33	2.0x10 ⁷	4
HIJASS	1115	12.	-1000 - 10000 ^d	18	400	13	222	3.6x10 ⁷	5
HIJASS-VIR	32	12.	500 - 2500	18	3500	4.	31	1.1x10 ⁷	6
HIDEEP	60	15.5	-1280 - 12700	18	9000	3.2	173	8.8x10 ⁶	7
HIZSS	1840	15.5	-1280 - 12700	27	200	15.	110	4.1x10 ⁷	8
HICAT	21341	15.5	300 - 12700	18	450	13.	4315	3.6x10 ⁷	9
HIPASS		15.5	300 - 12700	18	450	13.	(6000)	3.6x10 ⁷	10
AUDS	0.4	3.5	-960 - 47000 ^e	TBD	70 × 3600	0.02	(40)	0.6x10 ⁶	11
AGES	TBD	3.5	-960 - 47000 ^e	TBD	300	0.5	TBD	1.4x10 ⁶	12
ALFALFA	7000	3.5	-2000 - 18000	11	28	1.6	(16000)	4.4x10 ⁶	

z_{max} ~ 0.03 ... 0.15

δz ~ 0.0001

Comparaison de quelques relevés à 21 cm

Arecibo ALFALFA blind HI survey



Observations à 21 cm comparées à l'optique

- ❖ Possibilité d'observations spectro-photométrique à 21 cm - **seule signature spectrale en bande L (~GHz)**
- ❖ Bande: $\sim 100 \text{ MHz} \dots 1500 \text{ MHz}$ - $v = f(z)$, $z: 0 \dots 10$
 $1420 \text{ MHz} @ z=0, 946 \text{ MHz} @ z=0.5, 720 @ z=1, 284 @ z=5, 129 @ z=10$
- ❖ La résolution des instruments radio limitée par la diffraction:
 $700 \text{ MHz}: D=100 \text{ m} \rightarrow \sim 20', D=1\text{km} \rightarrow \sim 2', D=100 \text{ km} \rightarrow \sim 1''$ [$2' \rightarrow 1 \text{ Mpc} @ z = 1$]
- ❖ Mesure d'intensité en optique, amplitude & phase en radio
 - ❖ \rightarrow Interférométrie et spectroscopie en radio
- ❖ Bruit instrumental (détecteur/électronique) souvent négligeable en optique ($R\text{Onoise} < 5 \text{ e}$), mais dominant en radio ($T\text{sys} \sim 20-100 \text{ K}$)
- ❖ Pollution lumineuse, et diffusion atmosphérique en optique
Interférence électromagnétique (RFI), ionosphere (à basse fréquences) en radio

Cartographie 3D à 21 cm : T21(α, δ, 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) (Tsys)**
- ≡ **Avant-plans: Emissions diffuses (Galactique) et sources radio → séparation des composantes**
- ≡ **Calibration, instrument stability, RFI ...**

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

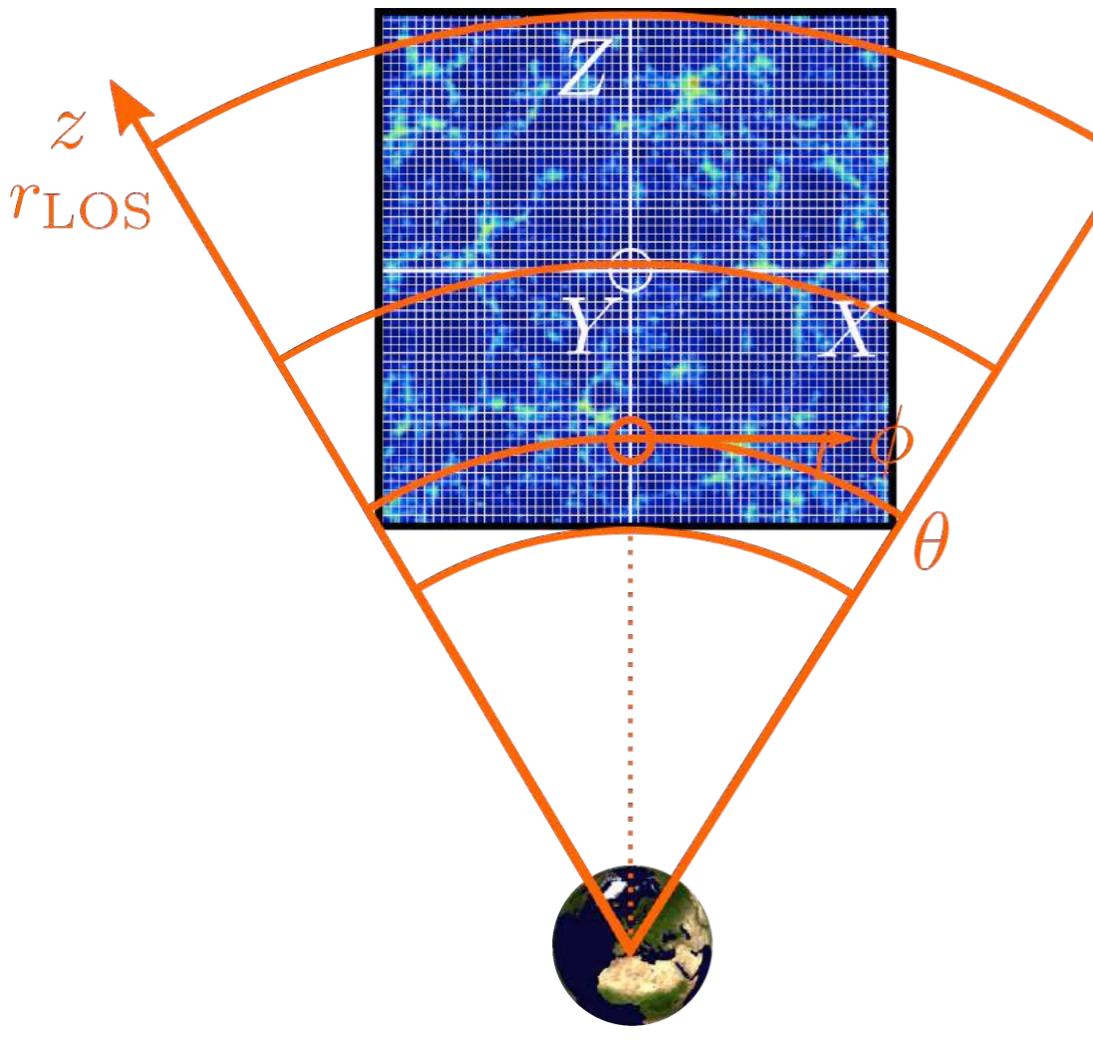
Wyithe et al. MNRAS 2008, arXiv:0709.2955

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}

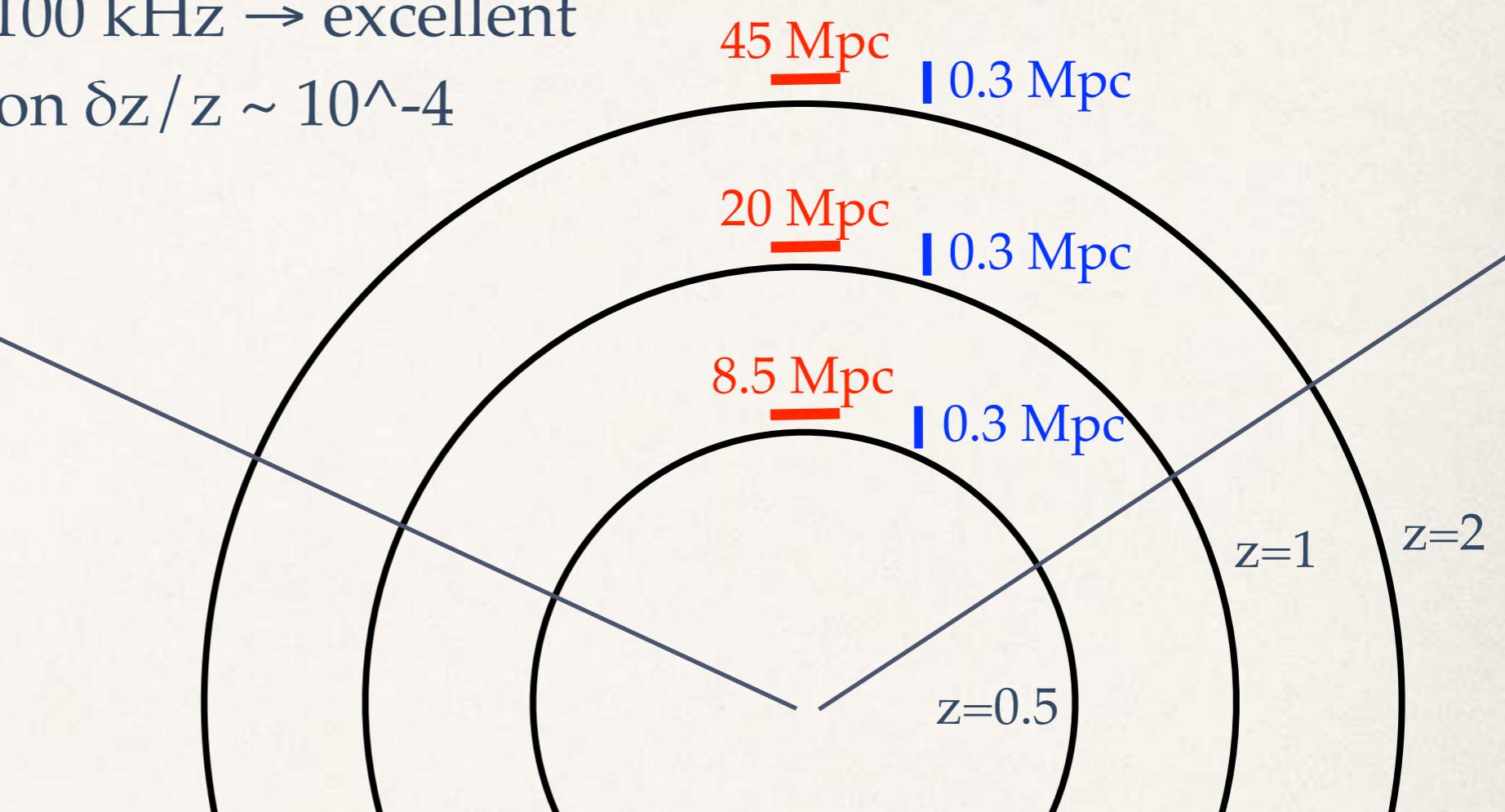
Extraction du signal:

- 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 $\delta\theta \sim \lambda/L$,

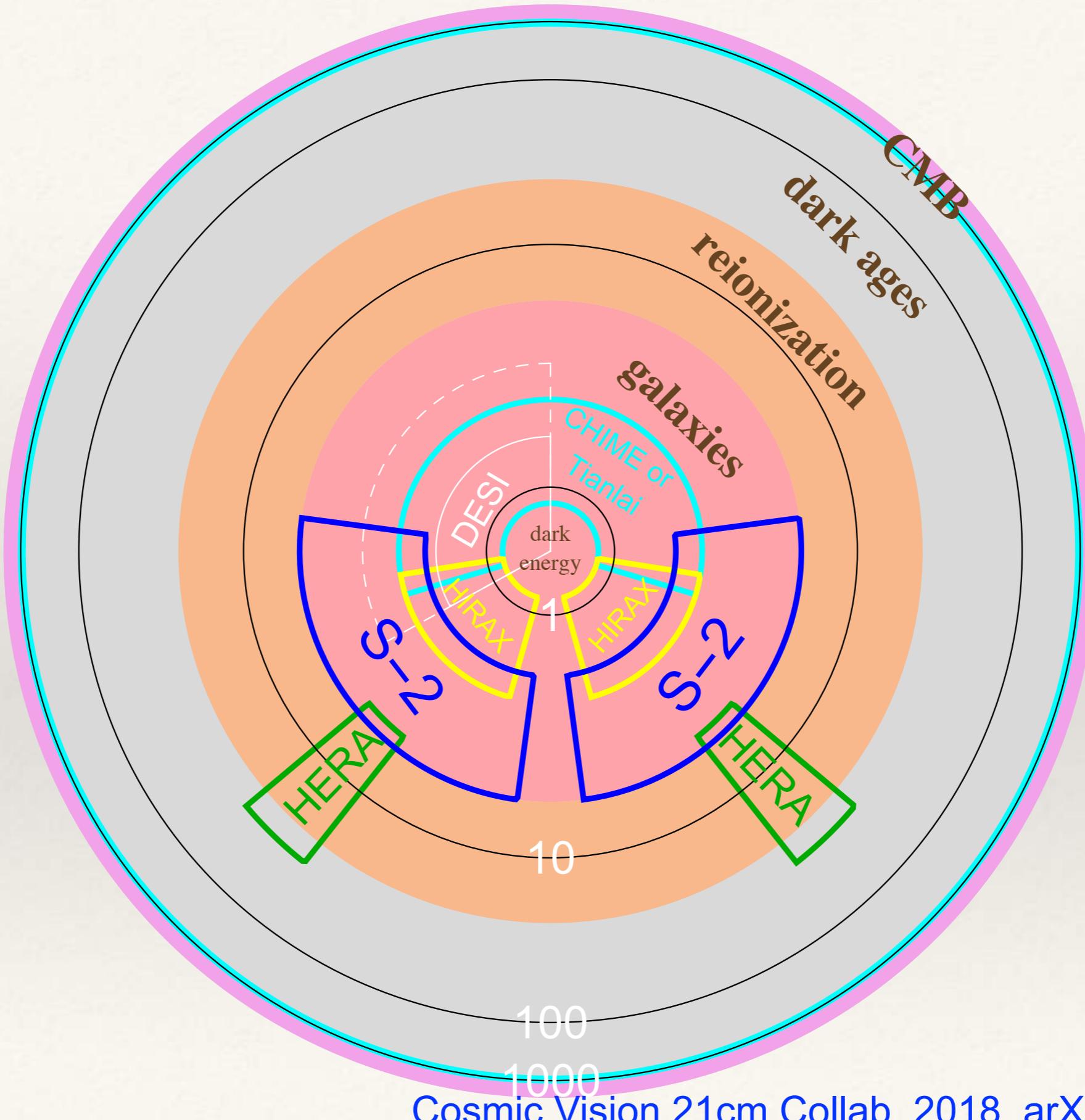
deteriorating with redshift z

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



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

Univers potentiellement accessible à 21 cm



100 -



R. Ansari
2011

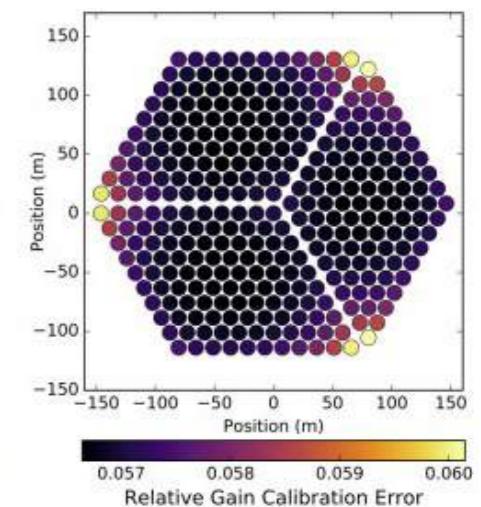
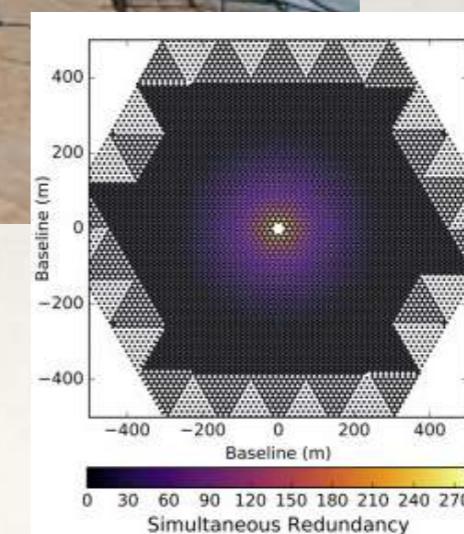
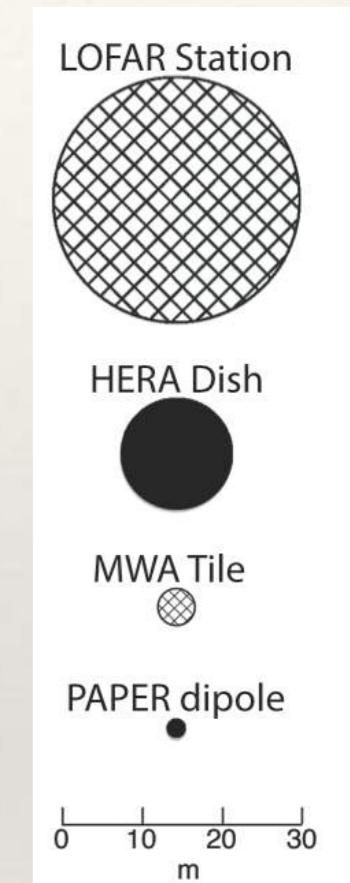
Intensity mapping dark energy survey instrument
concept - Dense interferometric array
8-12 cylindrical reflectors (CRT)

OR

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

2011
RAID
RadioArray of Inexpensive
Q-Dishes
Sep, Munich, TaUP conference,

HERA : Hydrogen Epoch of Reionisation Array

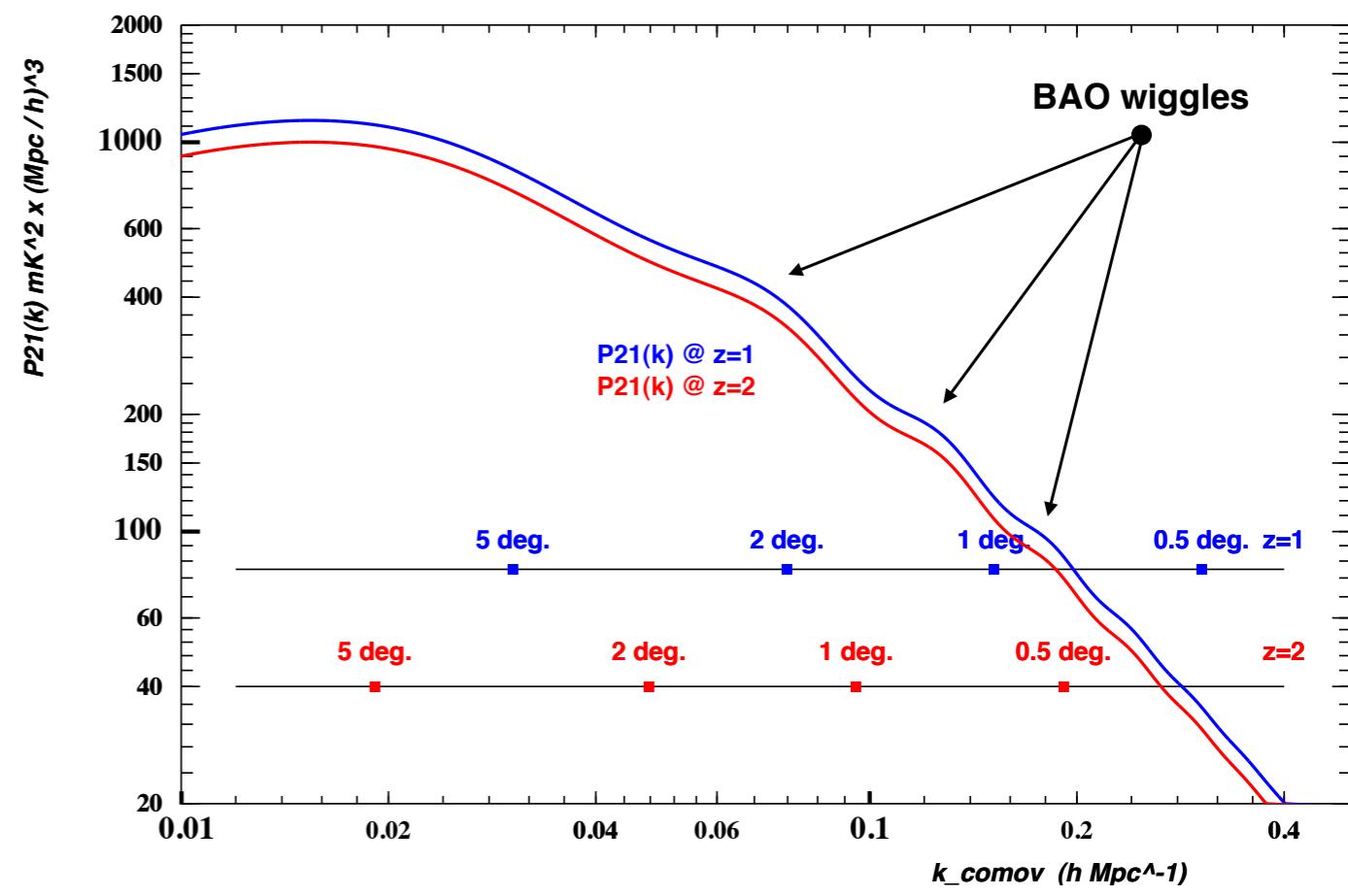
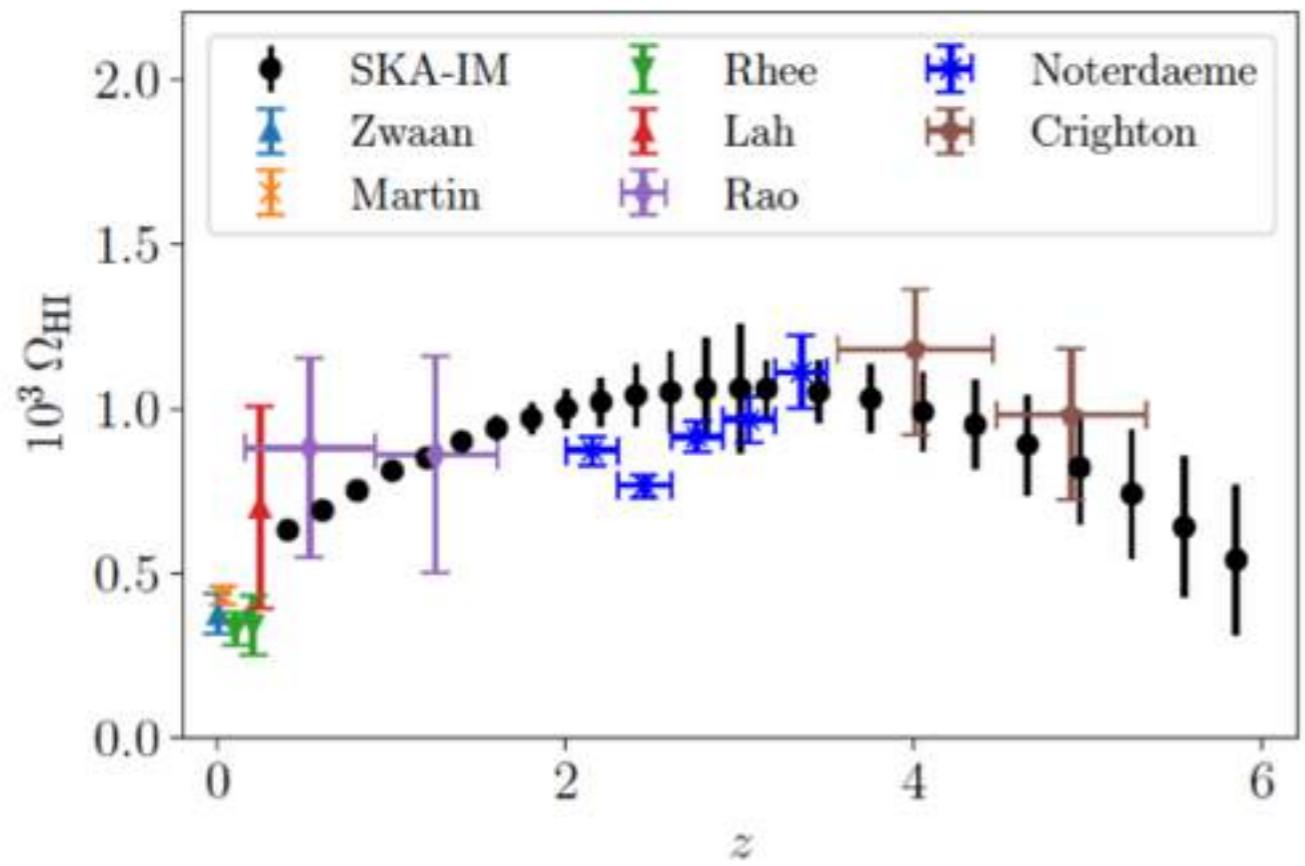


Pober et al. ApJ 2014, arXiv:1310.7031

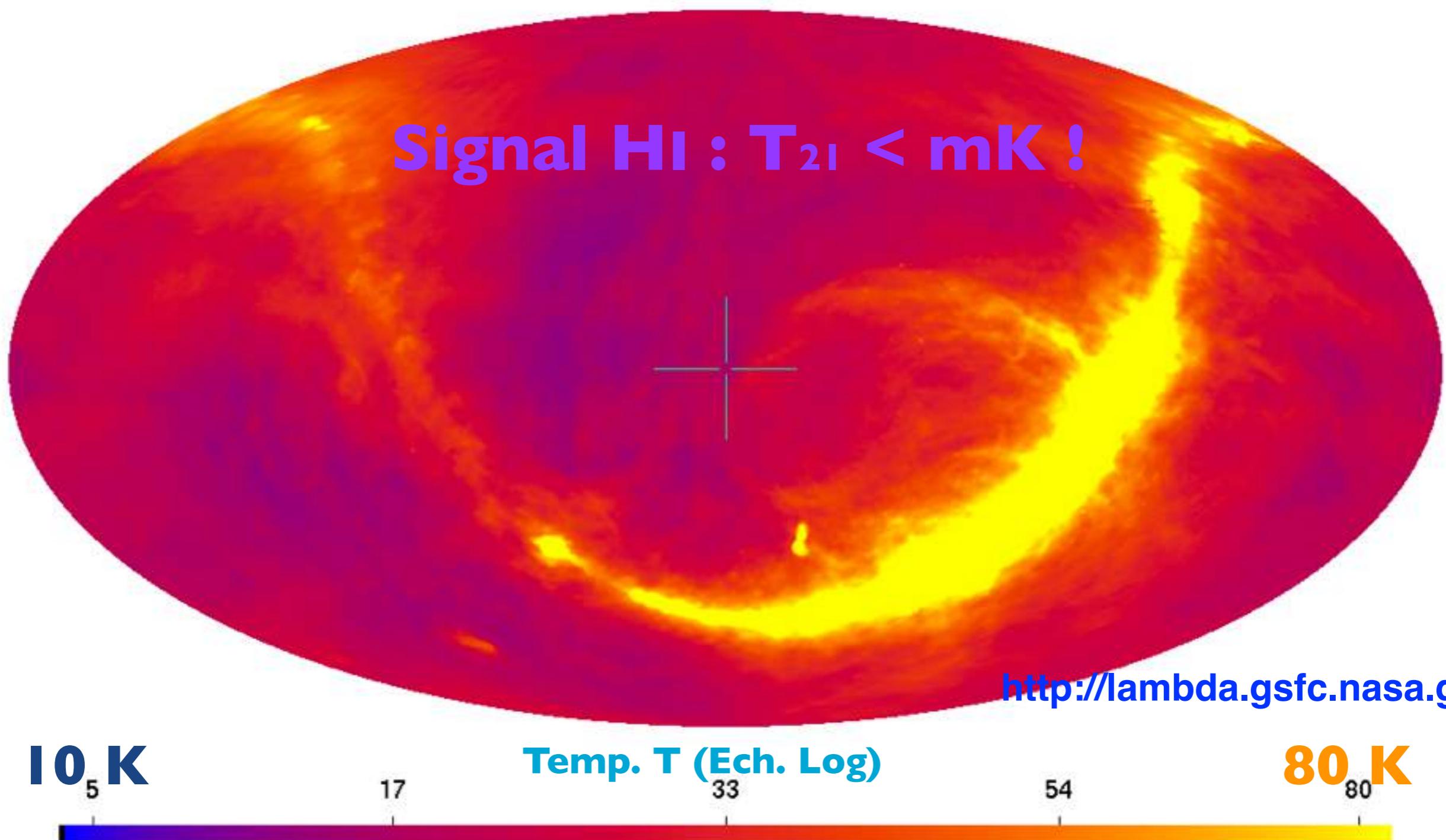
Intensité du signal H_I à 21 cm

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

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



Les avant-plans



Carte Haslam à 408 MHz (synchrotron Galactic)

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

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

T_{sync} : 10 K \rightarrow ~4 K \rightarrow ~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 Λ ?
- ❖ ...

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)

$$\begin{array}{ccc} P(D|\mathcal{H}_a) & P(D|\mathcal{H}_b) & \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ & & \frac{P(\mathcal{H}_a|D)}{P(\mathcal{H}_b|D)} \\ P(D|\mathcal{H}, w) & & P(w|D, \mathcal{H}) \end{array}$$

Approche Bayésienne

- ❖ On utilise le théorème de Bayes / approche fréquentiste

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

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

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

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

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

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

- ❖ 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 bruité : 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 $H(j\omega)$

$$d(t) = a(t) + n(t) \quad \begin{matrix} \text{(signal et bruit indépendant, admettant une} \\ \text{transformée de Fourier)} \end{matrix}$$

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

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

$$(d) = \mathbf{R} \cdot (a) + (n) \quad \mathbf{H} = (\mathbf{R}^\dagger \mathbf{N}^{-1} \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^\dagger \mathbf{N}^{-1}$$

$$(\hat{a}) = \mathbf{H} \cdot (d) \quad \text{with} \quad \mathbf{N} = \langle (n)^\dagger \cdot (n) \rangle$$

Dans le cas des observations interférométriques du signal à 21cm 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 $Sky(\alpha, \delta, \nu)$ 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

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

Angular domain

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

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

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

Angular frequency (u,v) plane

$$(u, v)$$

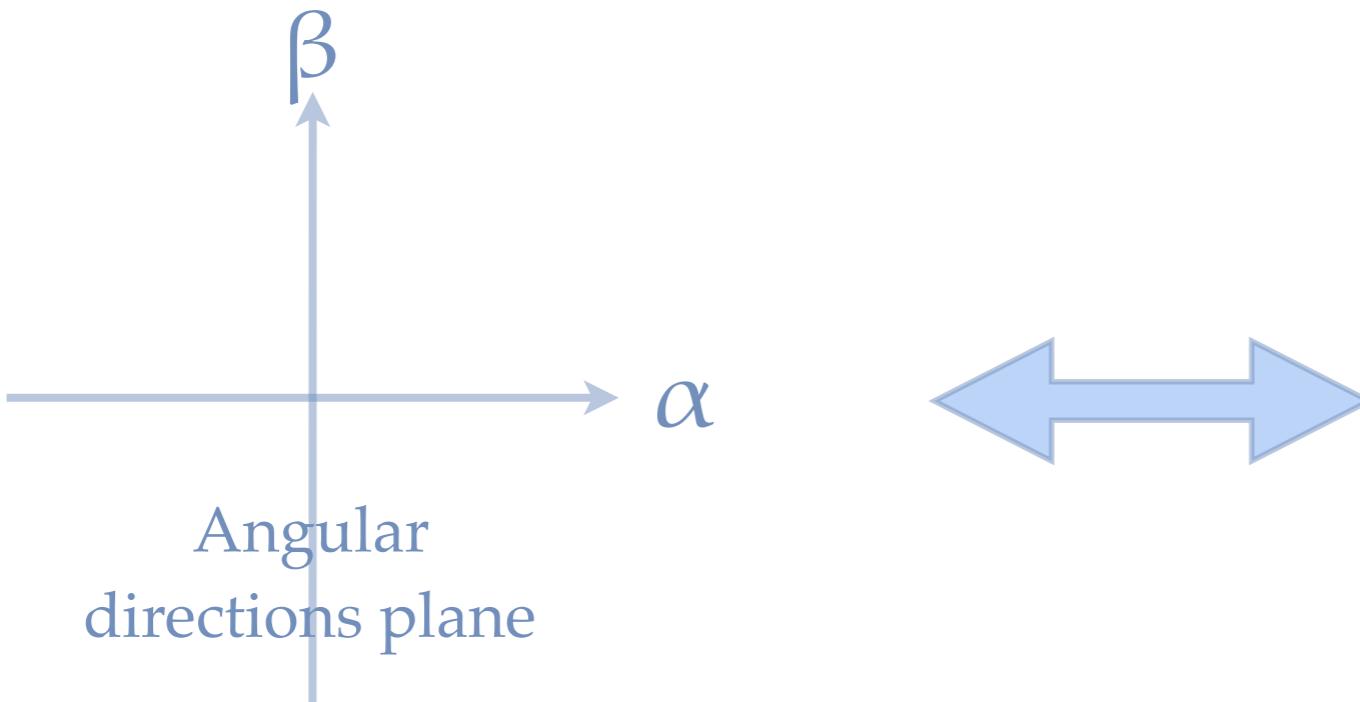
$$\mathcal{I}((u, v), \nu)$$

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

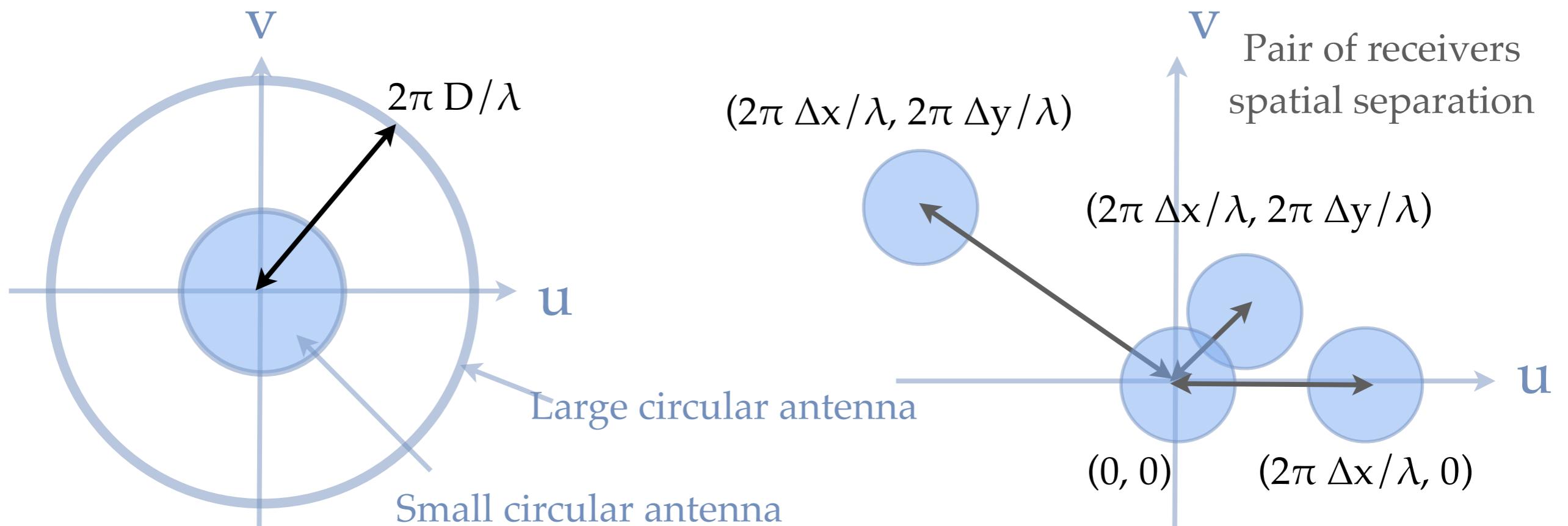
$$\mathcal{V}_{ij}(\nu \rightarrow \lambda) \simeq \iint du dv \mathcal{I}((u, v), \nu) \mathcal{L}(u - \frac{\Delta x_{ij}}{\lambda}, v - \frac{\Delta y_{ij}}{\lambda}, \nu)$$

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)

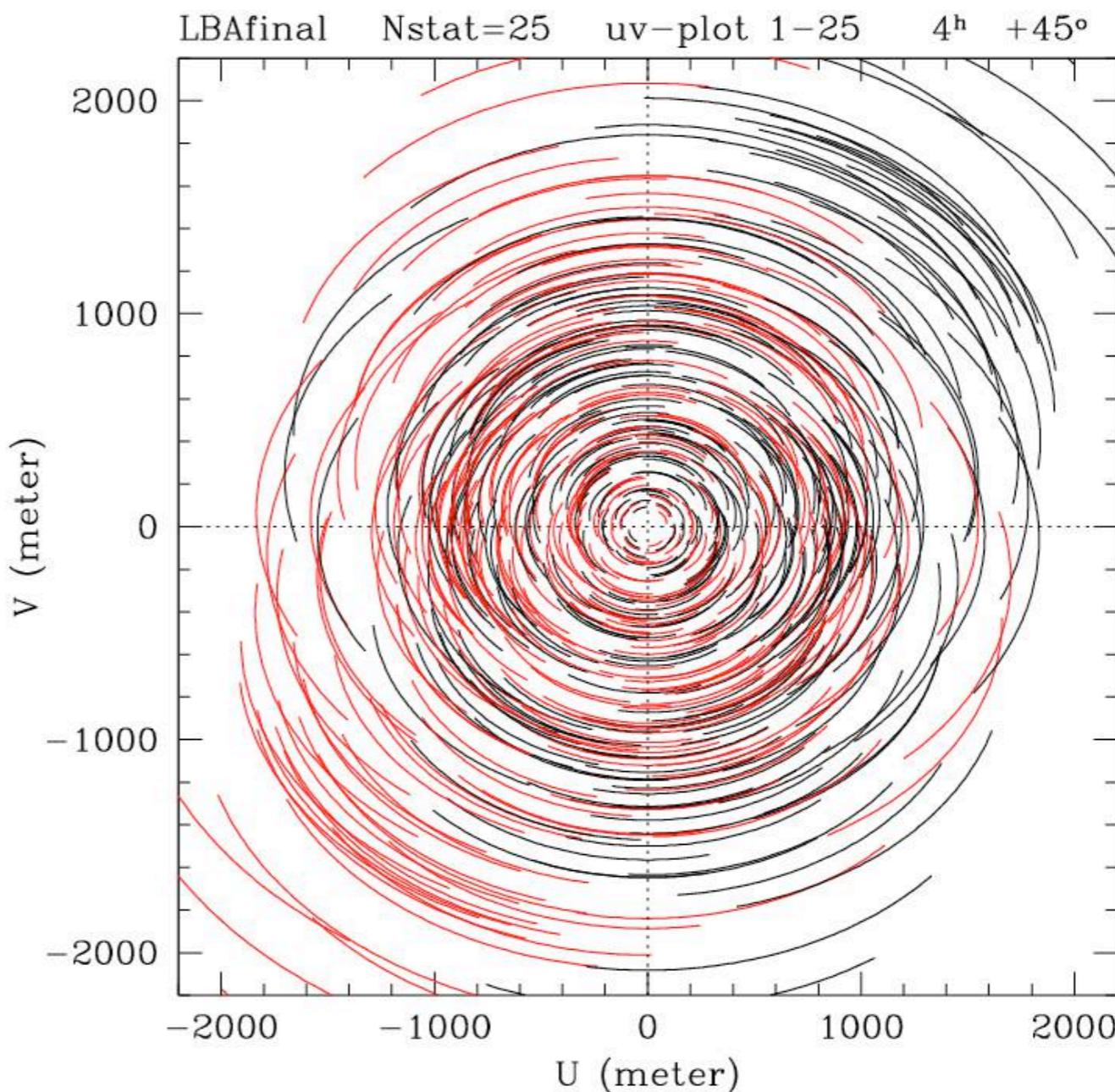
uv-coverage for LOFAR LBA (core only)

Slide borrowed from Ger de Bruyn (Astron/NL)

25 stations

4h synthesis

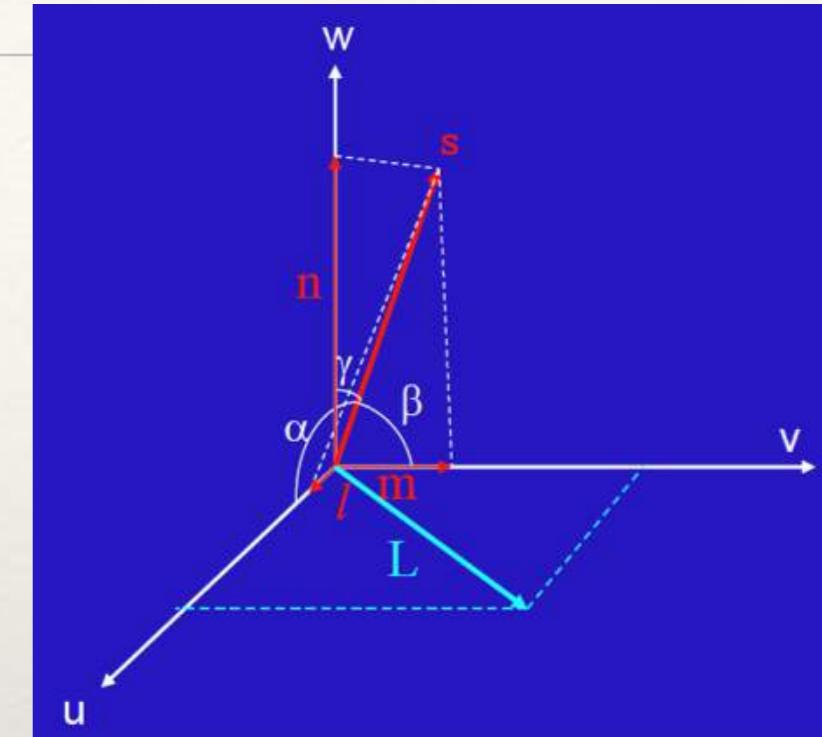
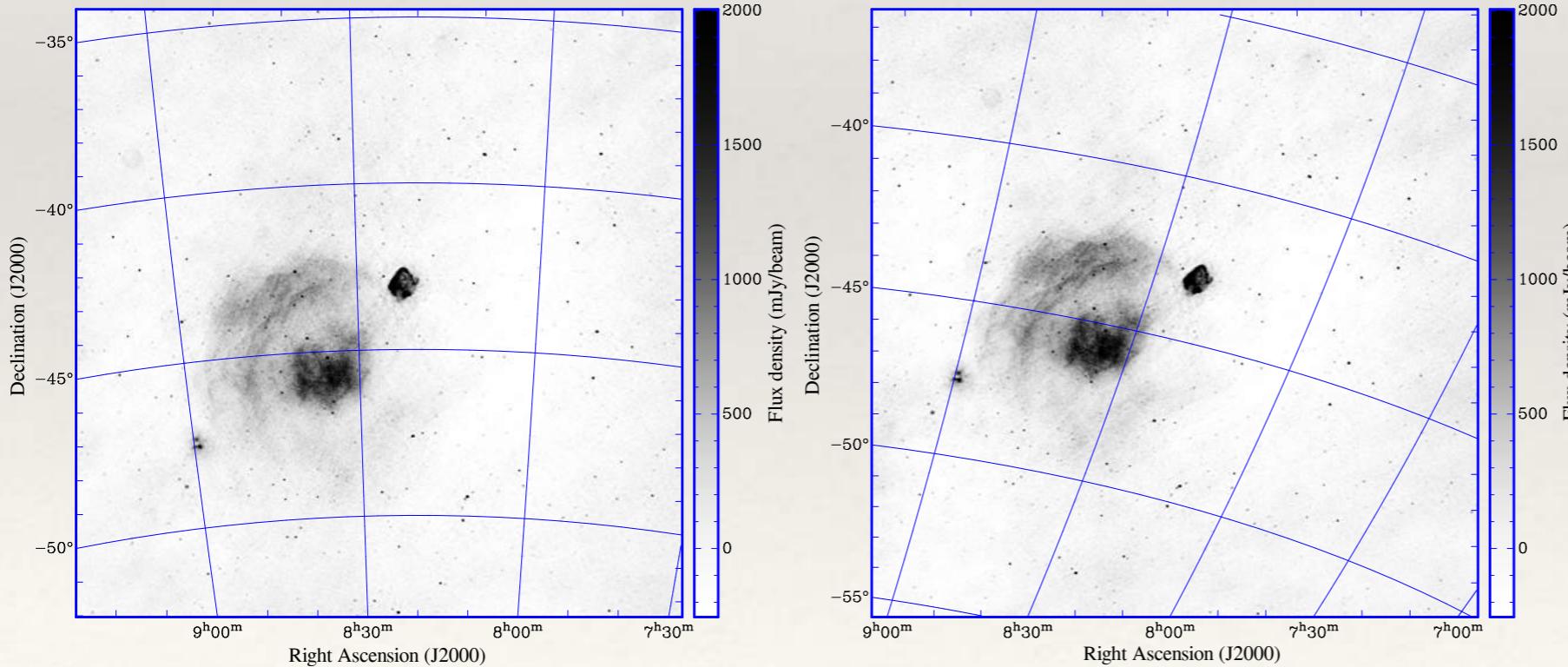
+45°



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

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

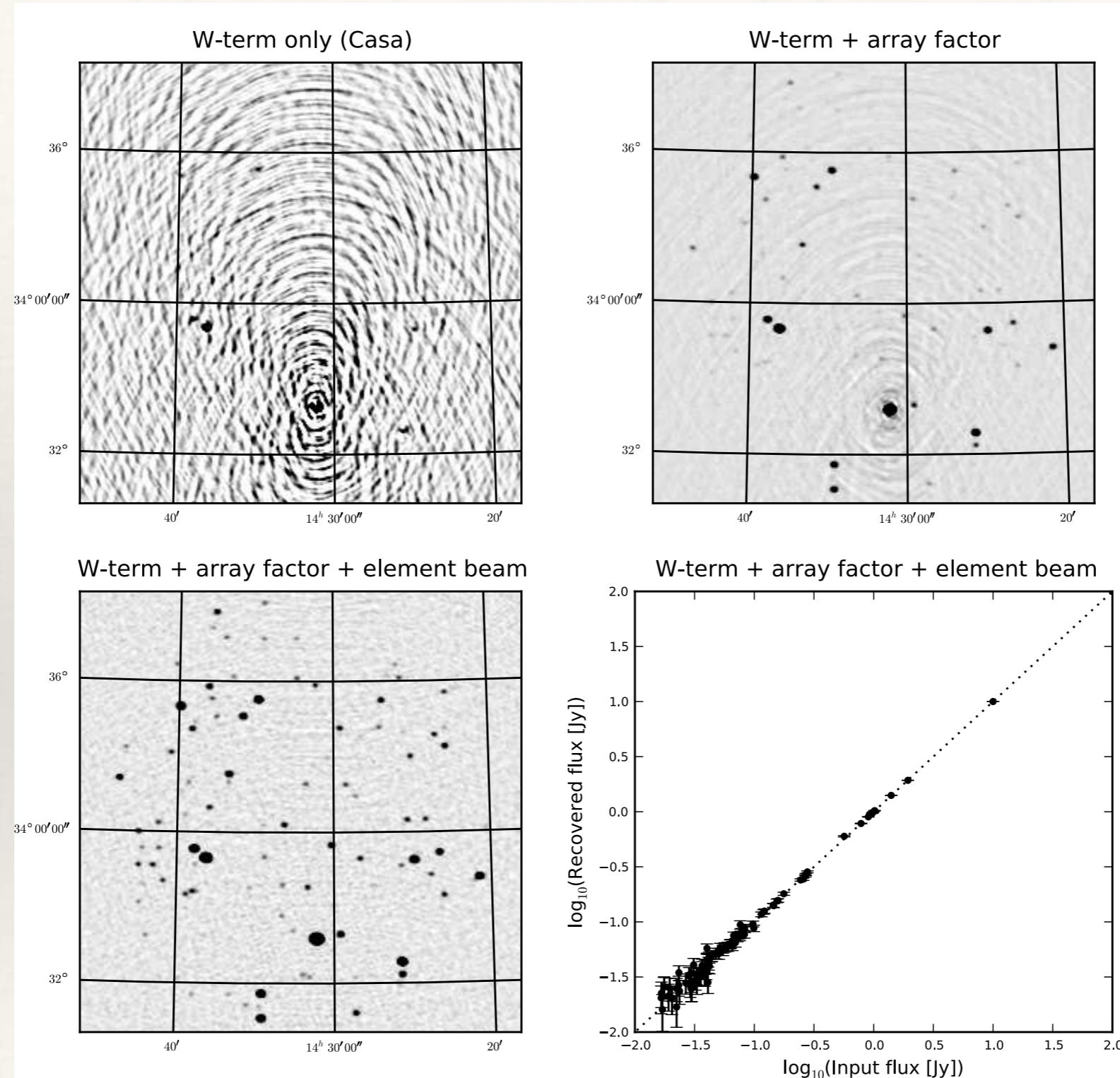
$$V_{ij}(u, v, w) = \int A_{ij}(l, m, n) I(l, m, n) e^{-i2\pi[ul+vm+w(n-1)]} \frac{dl dm}{\sqrt{1 - l^2 - m^2}}$$



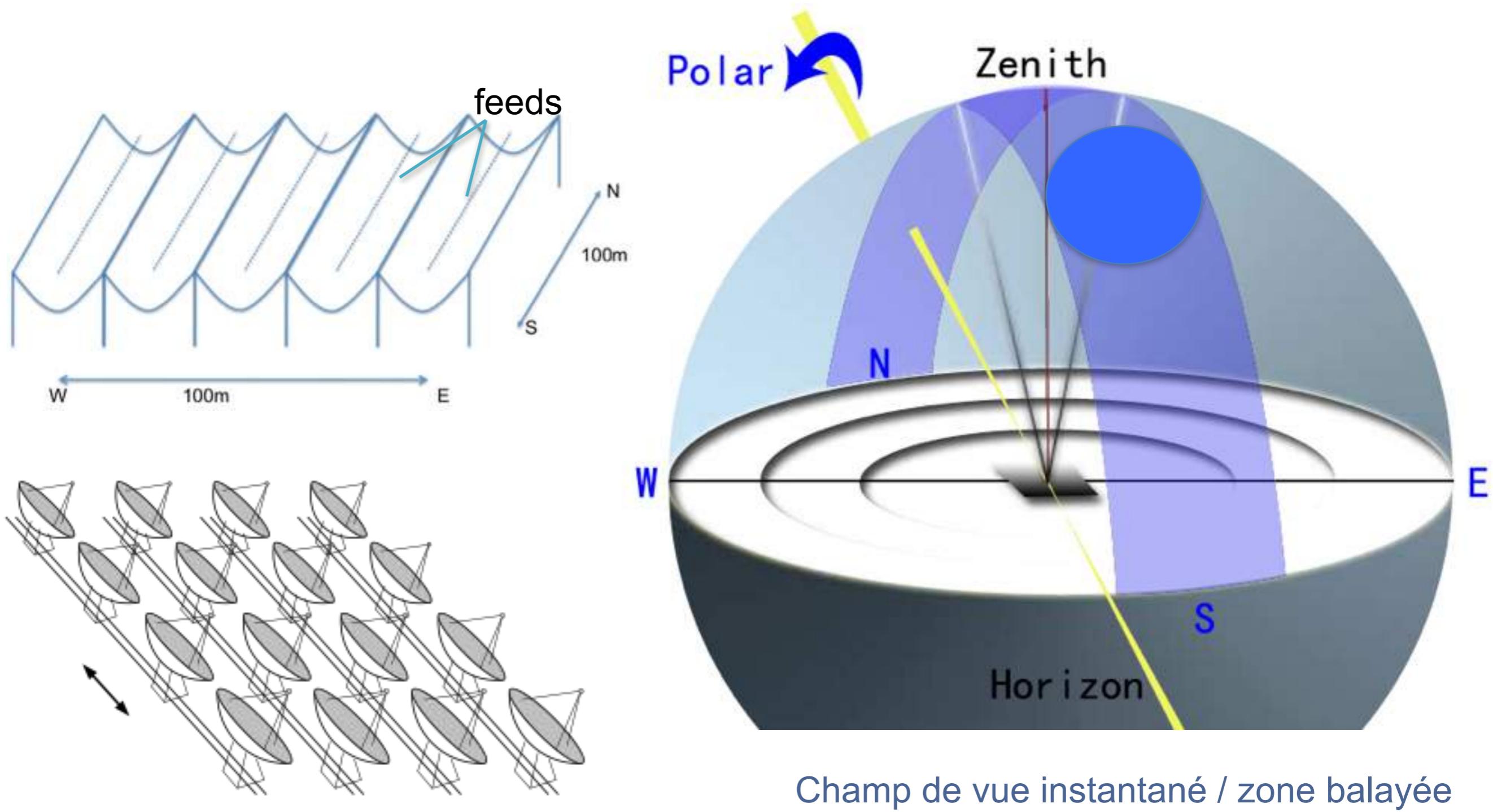
Observations des
SNR Vella et
Puppis, avec
MWA @ 149 MHz

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

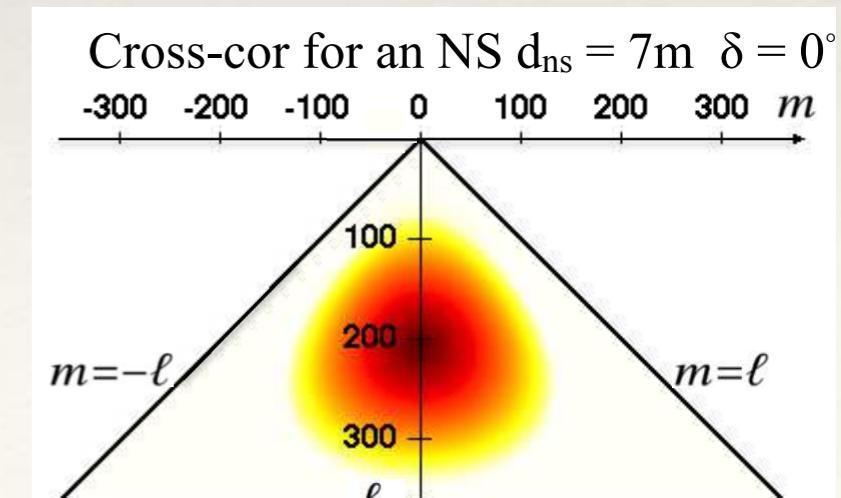
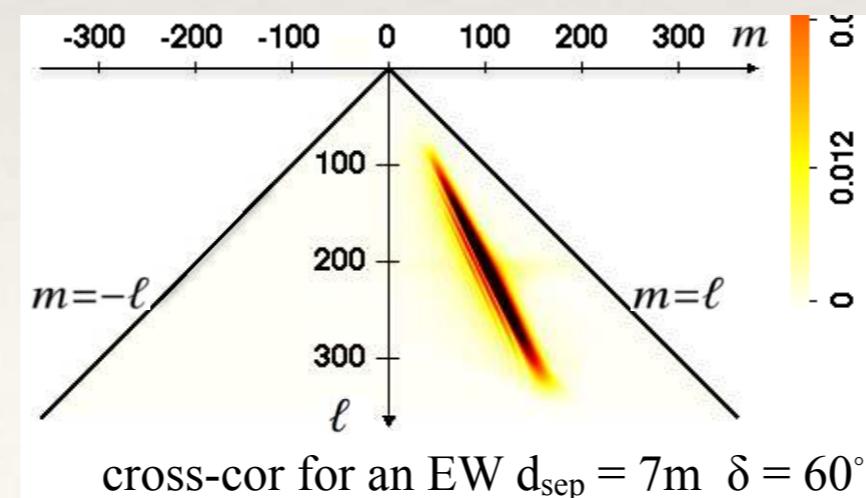
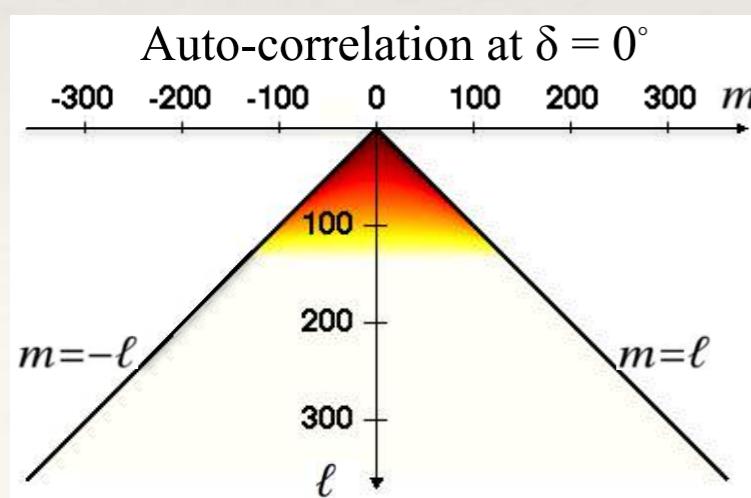
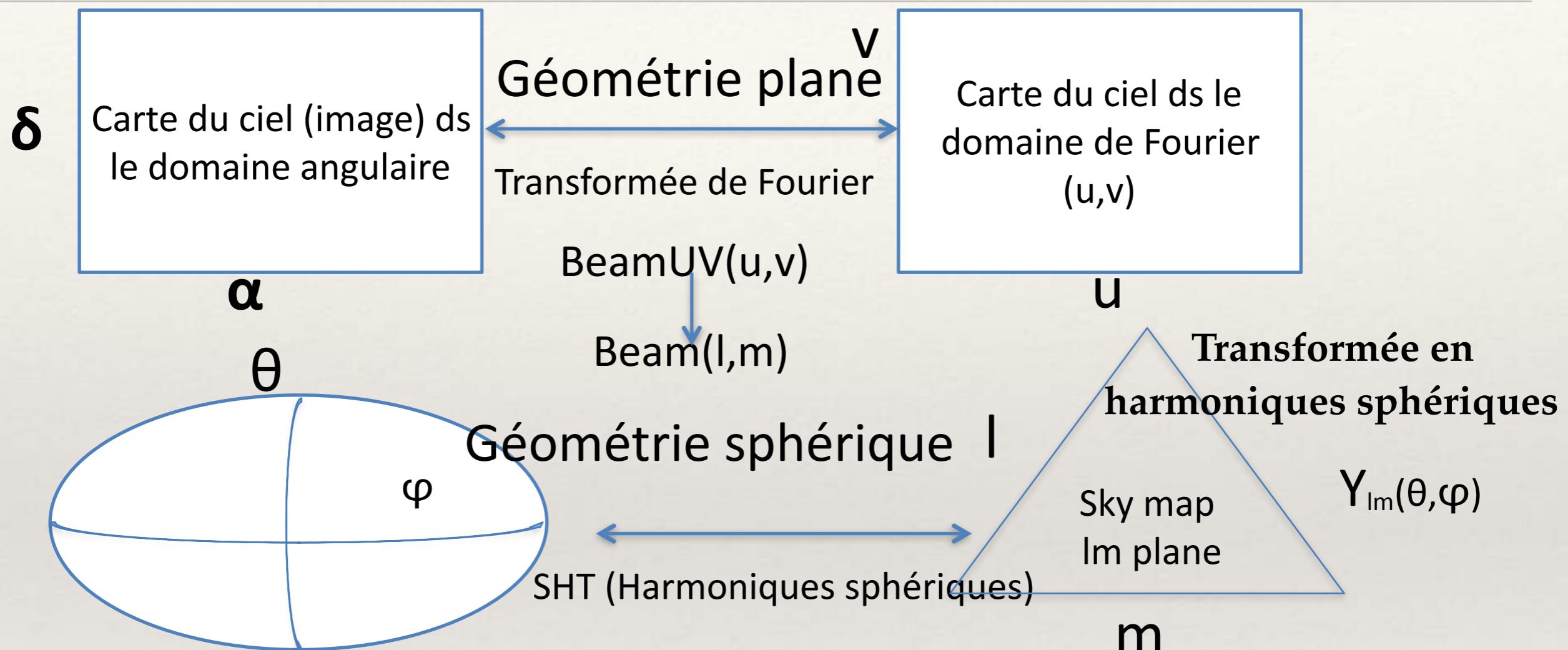
C. Tasse^{1,2,3}, B. van der Tol⁴, J. van Zwieten⁵, Ger van Diepen⁵, and S. Bhatnagar⁶



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



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



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

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

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

2. 10⁶ x 2. 10⁷ , 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)

$$\begin{aligned} I(\hat{\mathbf{n}}) &= \sum_{\ell=0}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} \mathcal{I}_{\ell,m} Y_{\ell,m}(\hat{\mathbf{n}}) & \tilde{\mathcal{V}}_{ij}(m) &= \sum_{\ell=|m|}^{+\ell_{\max}} (-1)^m \mathcal{I}(\ell, m) \mathcal{L}_{ij}(\ell, -m) \\ L_{ij}(\hat{\mathbf{n}}) &= D_i^*(\hat{\mathbf{n}}) D_j(\hat{\mathbf{n}}) e^{i \mathbf{k} \Delta \mathbf{r}_{ij}} & \tilde{\mathcal{V}}_{ij}^*(-m) &= \sum_{\ell=|m|}^{+\ell_{\max}} \mathcal{I}(\ell, m) \mathcal{L}_{ij}^*(\ell, m) \\ &= \sum_{\ell=0}^{+\infty} \sum_{m=-\ell}^{+\ell} \mathcal{L}_{ij}(\ell, m) Y_{\ell,m}(\hat{\mathbf{n}}) \end{aligned}$$

Shaw et al. 2014, arXiv:1302.0327

Zhang, Ansari et al. 2016, arXiv:1302.0327

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

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

$$[\mathcal{V}_{ij}] = [L_{ij}(\vec{\hat{n}})] \times [I(\vec{\hat{n}})] + [n_{ij}] \leftarrow \begin{array}{l} \text{noise} \\ \text{(vector)} \end{array}$$

↑
Set of visibilities
(vector)
Matrix encoding
instrument response
scan strategy
Vector representing
the sky brightness

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

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

$\ell_{max} \times \ell_{max}$

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)

$$\ell_{max} \times N_b \times n_{\delta_p}$$

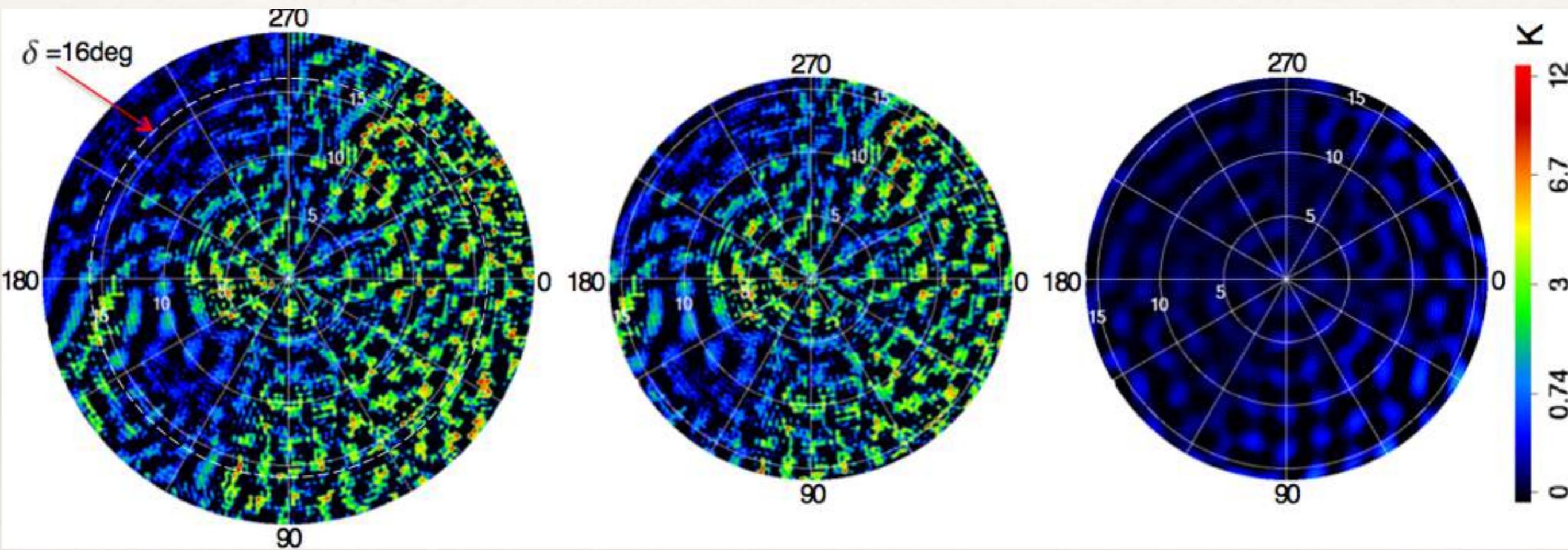
$$\begin{pmatrix} \tilde{\mathcal{V}}_{ij}^{\delta_p}(m_0) \\ \tilde{\mathcal{V}}_{ij}^{\delta_p}(m_1) \\ \dots \\ \tilde{\mathcal{V}}_{ij}^{\delta_p}(m_{max}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_0) & & & \\ & 0 & \boxed{\mathcal{L}_{ij}^{\delta_p}(\ell, m_1)} & \\ & &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

$\mathbf{L}_{\mathbf{m}_i}$

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

inversion $\rightarrow \mathbf{H}_m$

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

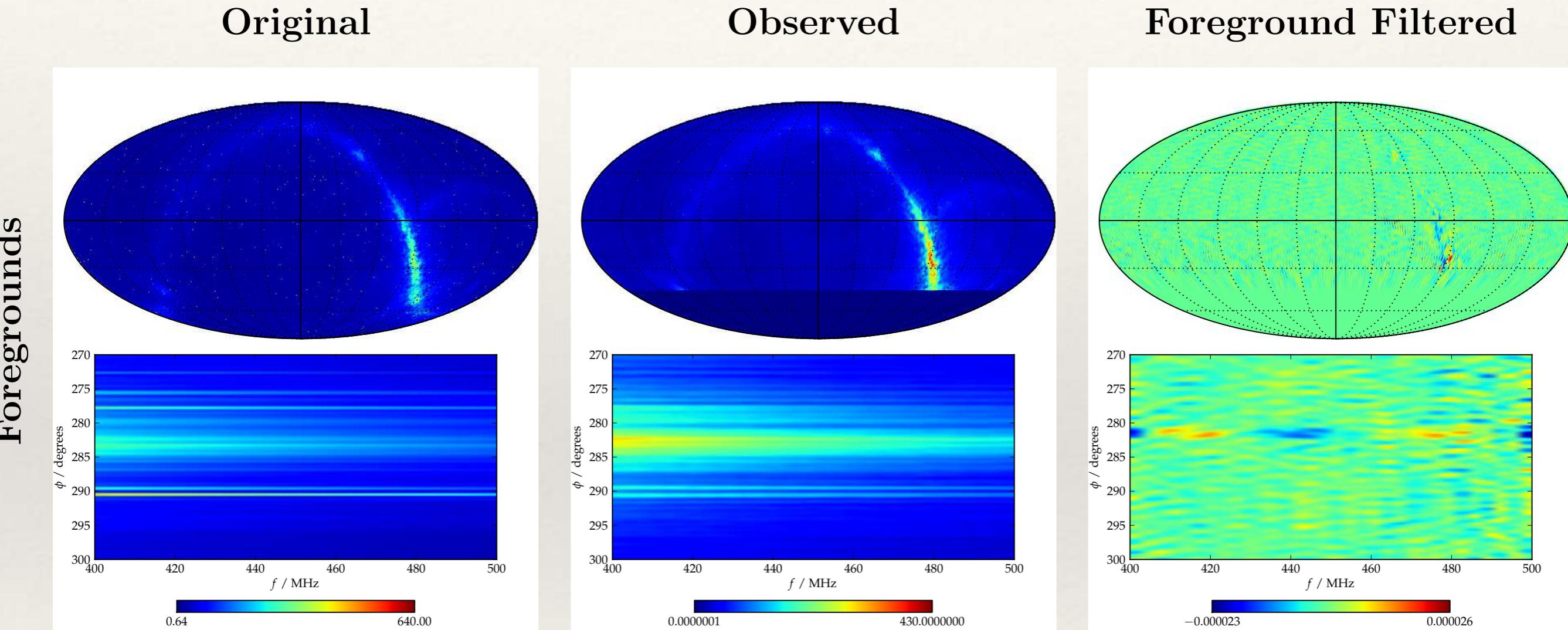


Applying high pass filter
to the LAB map

Reconstructed map
with filtering

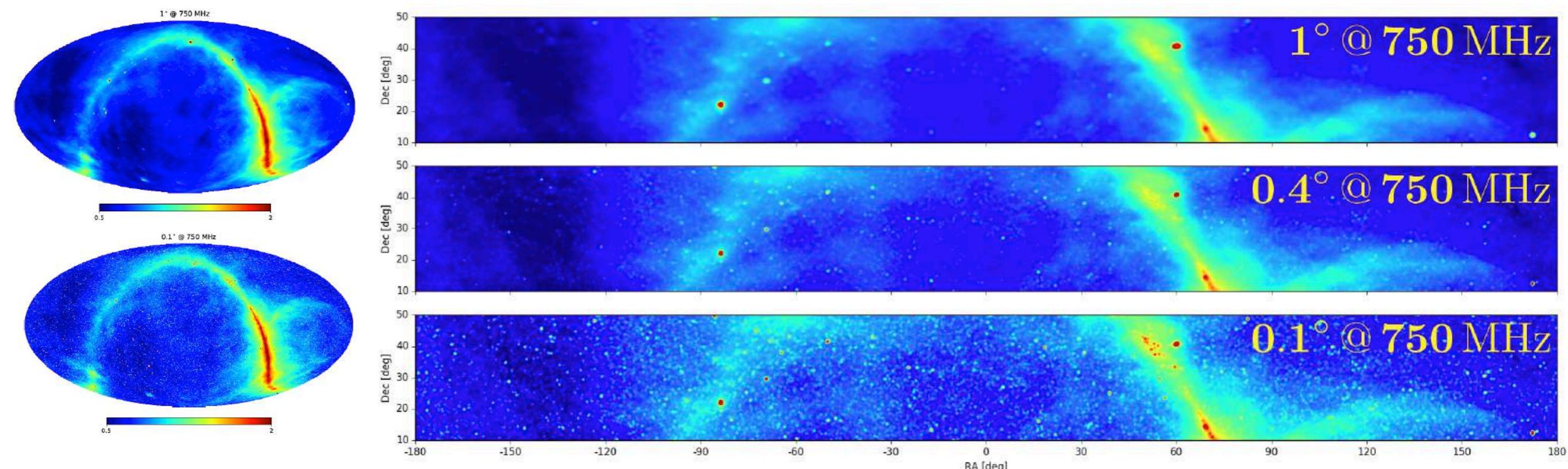
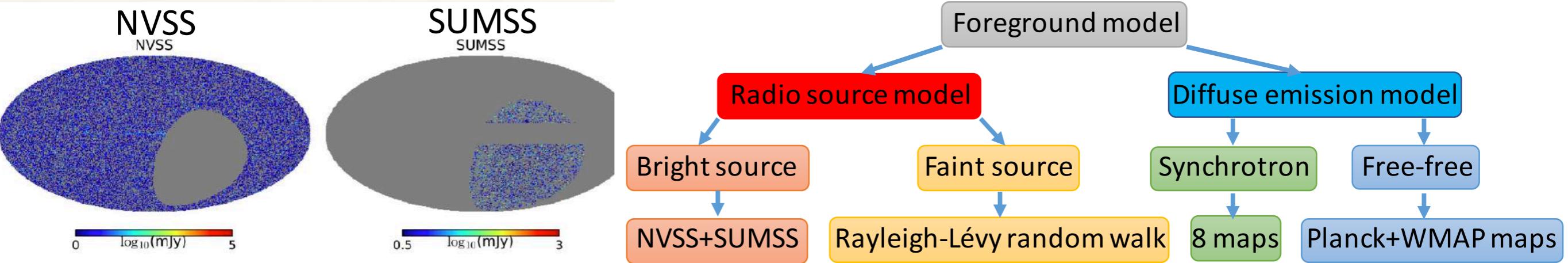
The difference between
left and center

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

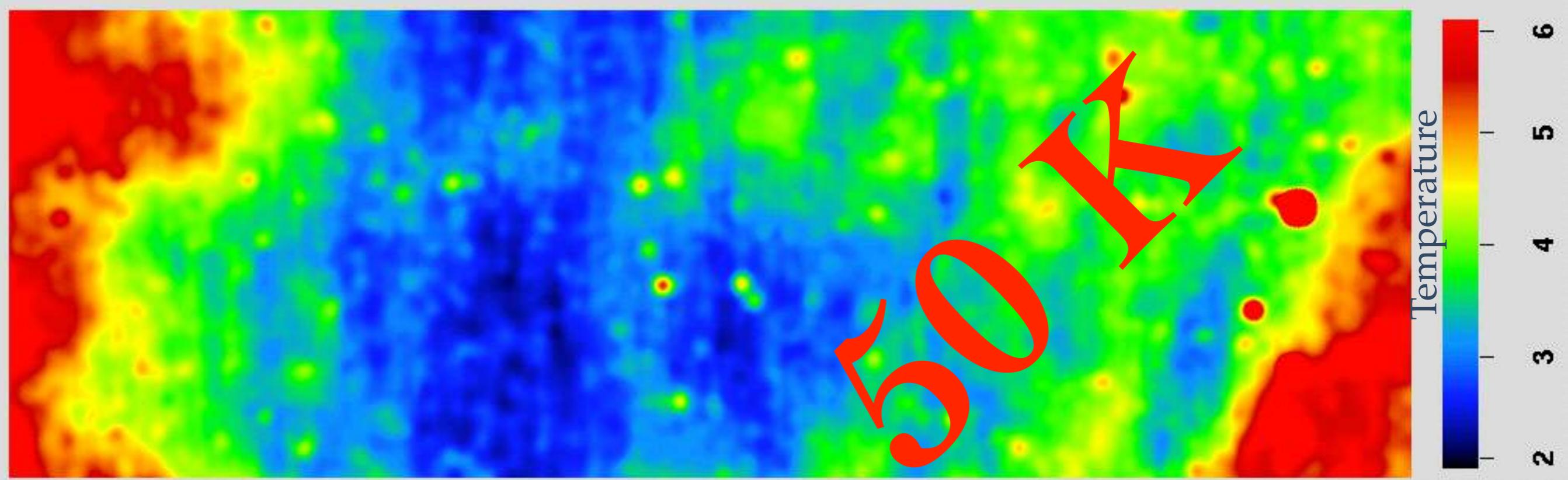


Séparation des composantes /
soustraction des avant-plans

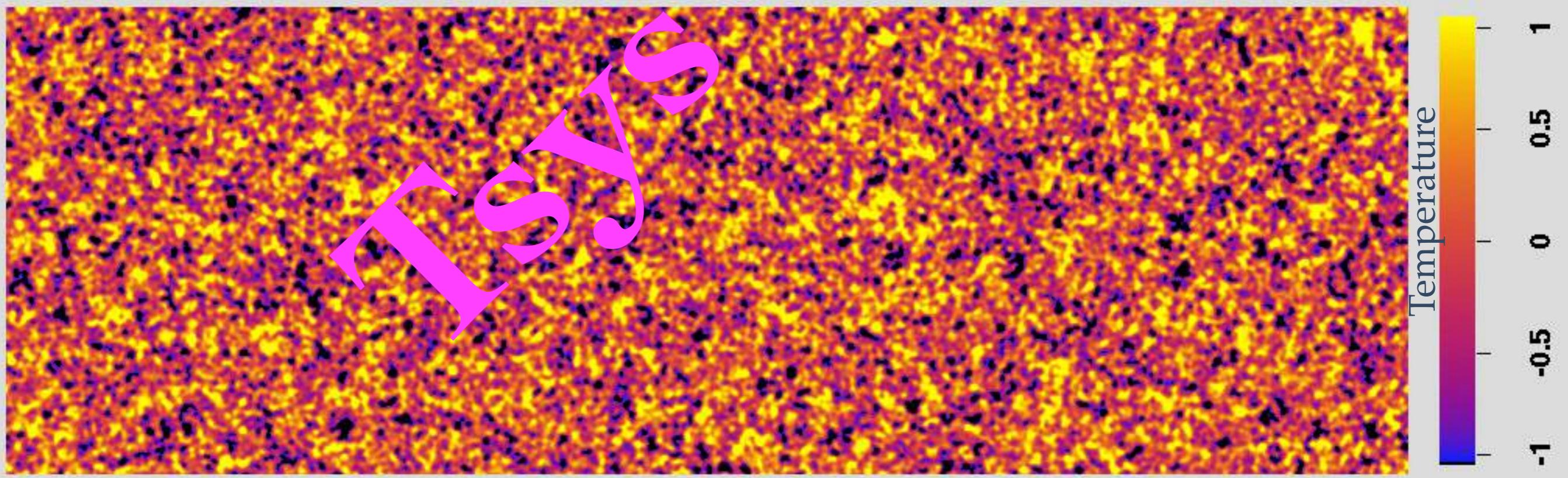
Les avant-plans (synchrotron Galactique et sources radio)



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



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



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 ...

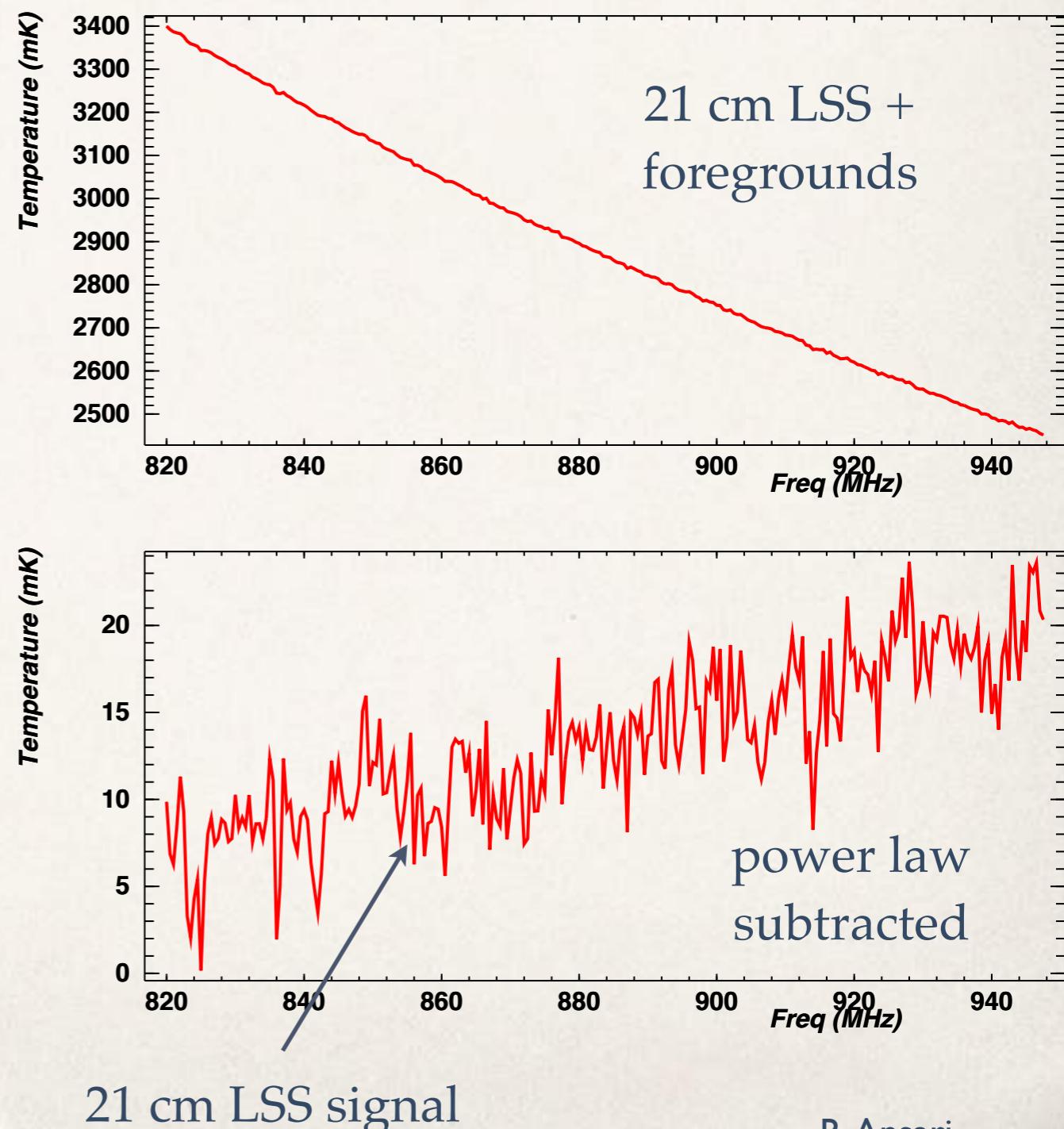


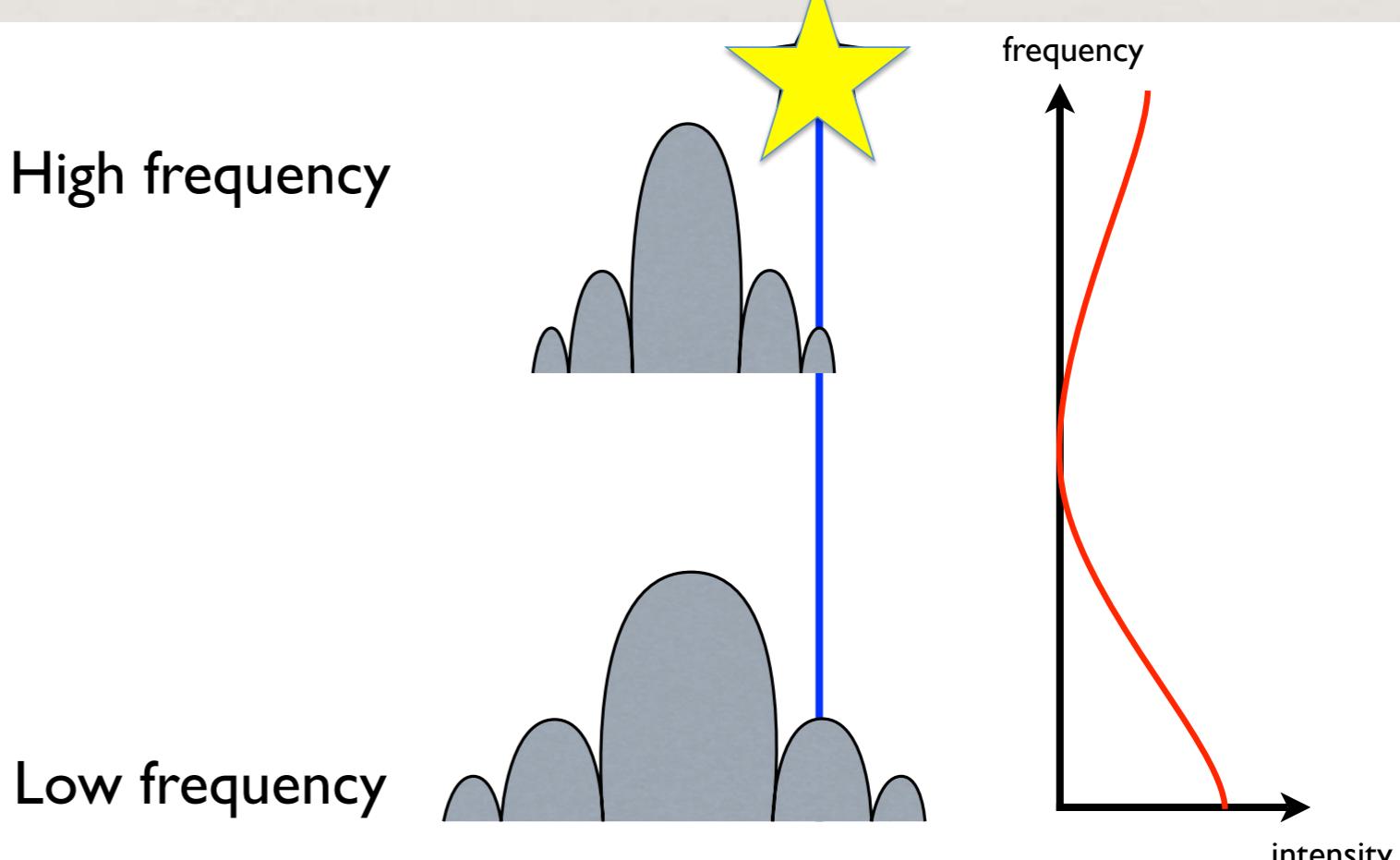
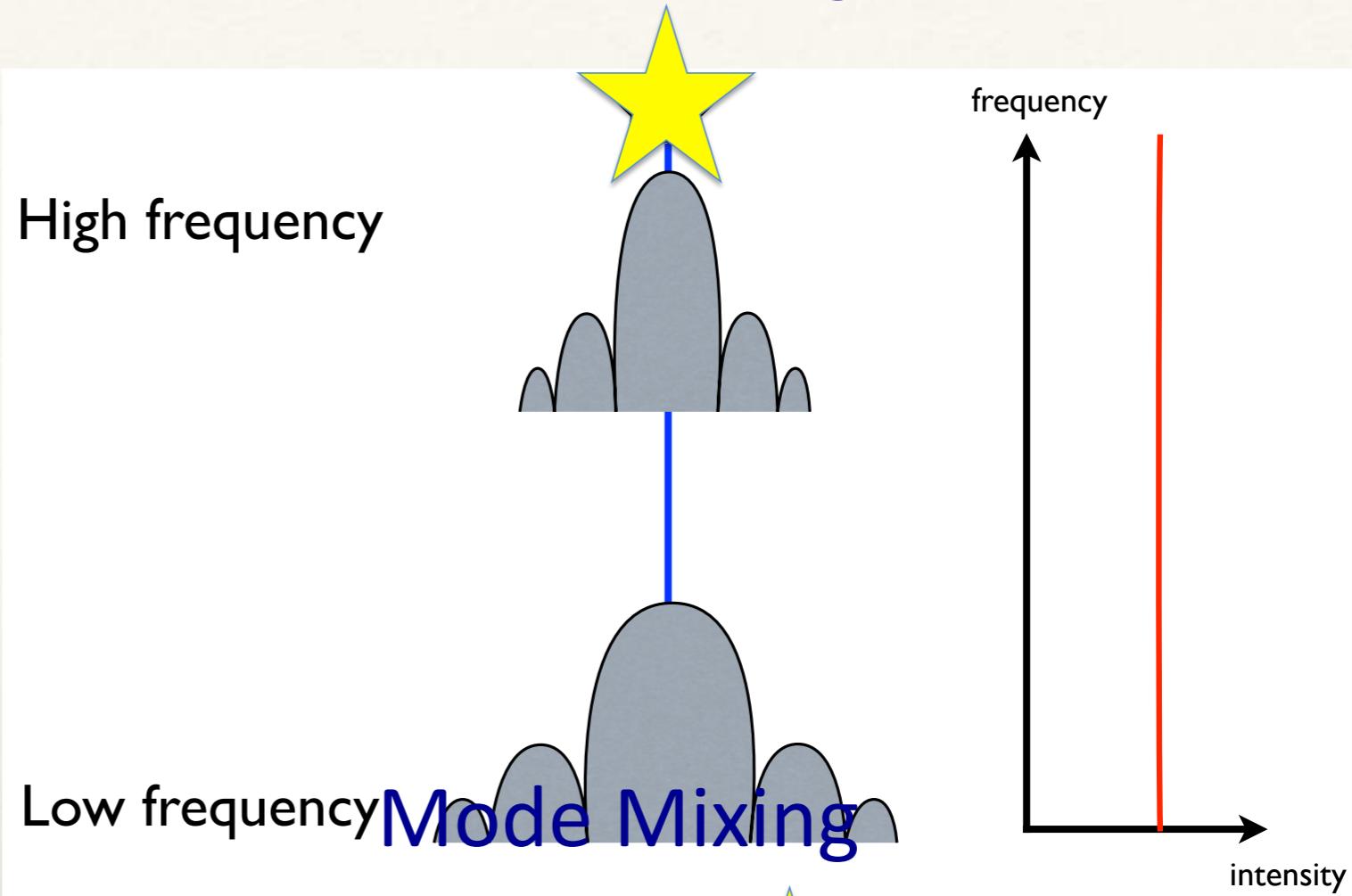
Illustration par Kris Sigurdson UBC

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

Mode Mixing



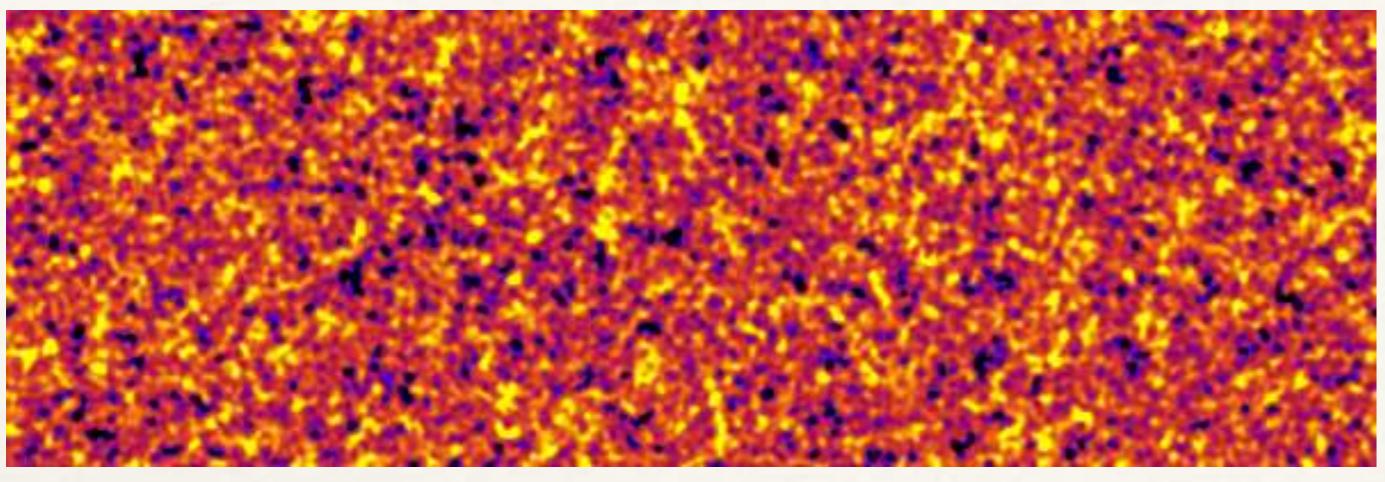
Blind foreground subtraction

- 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 ν -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)

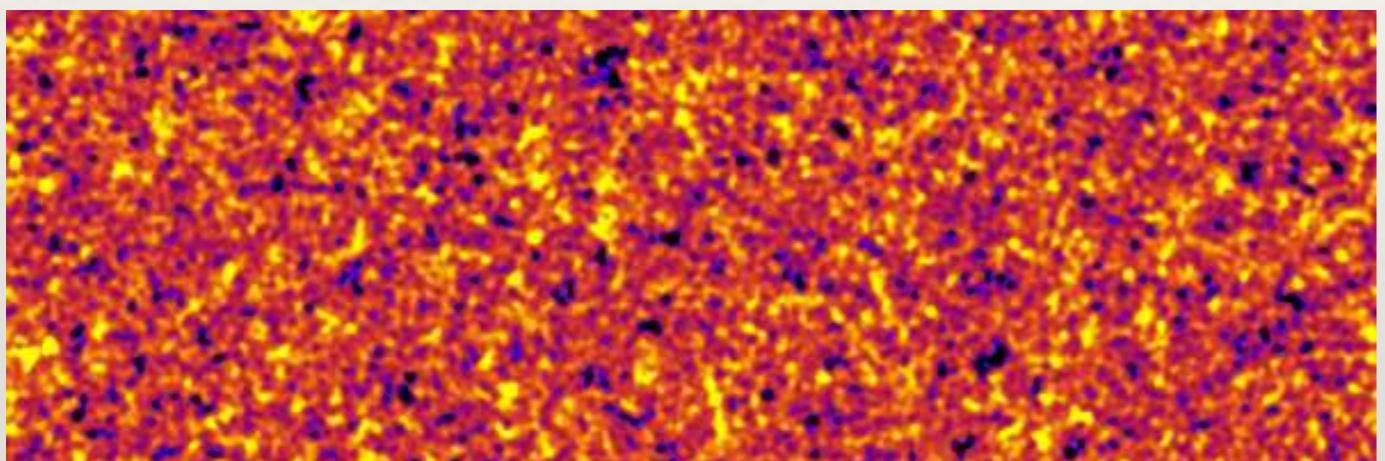
Alonso, Bull, Ferreira & Santos. ArXiv:1409.8667

Signal à 21cm @ z~0.6

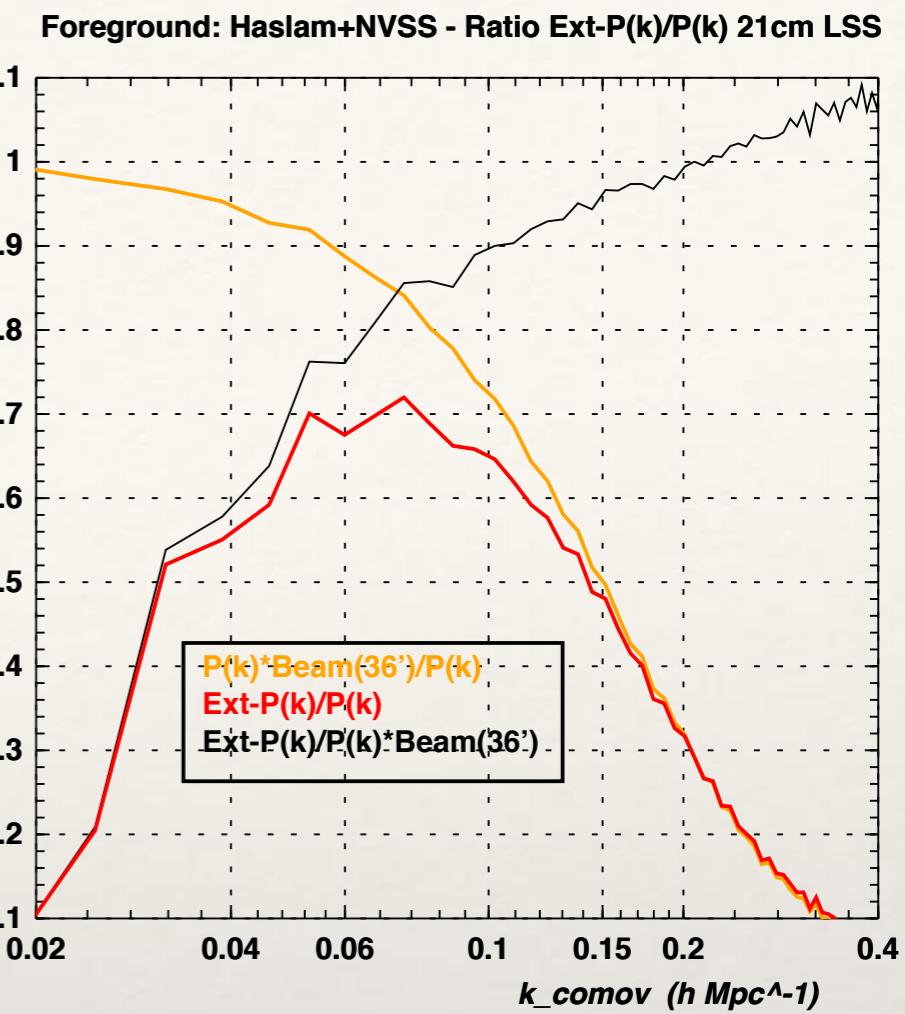
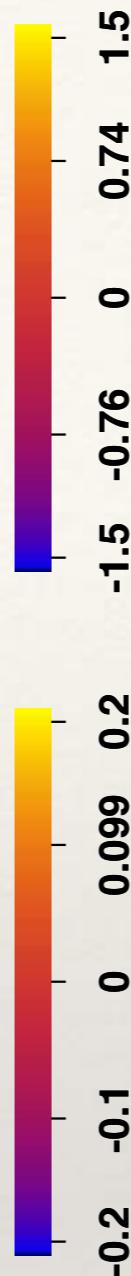


LSS-Map*Lobe(25 arcmin) @ 884 MHz

Signal 21cm après soustraction des avant-plans



ExtractedLSS Map @ 884 MHz (GSM)



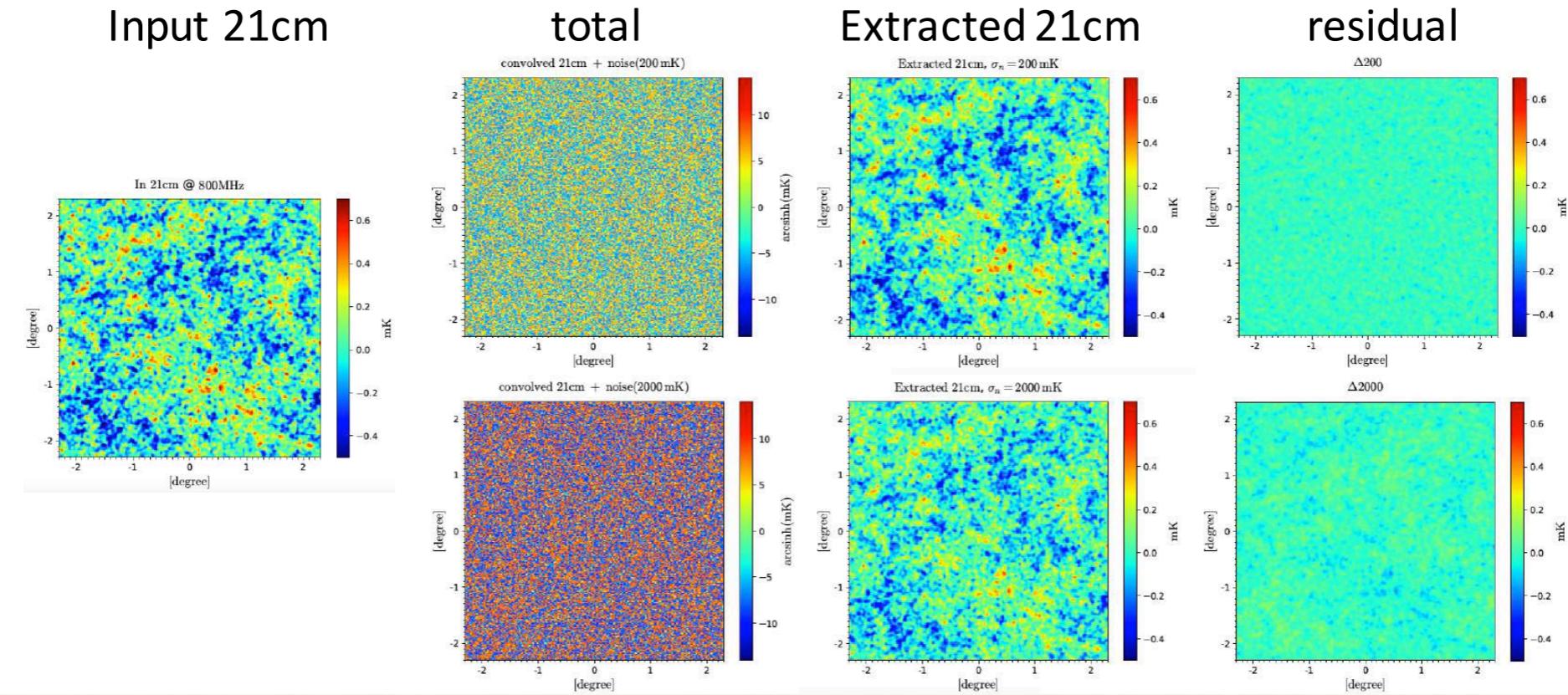
Signal à 21cm @ z~0.6 ,
fractions des modes mesurés après
soustraction des avant-plans en
fonction du nombre d'onde k

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 (Tsys) - Configuration instrumentale: réseau de 11x11=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)



24

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

- Filtering in frequency domain

- 1D Wiener filter designed to remove the foreground:

$$\mathbf{W}_v^f = \mathbf{F} [\mathbf{F} + \mathbf{S} + \mathbf{N}]^{-1}$$

The weight for each components

- Extract the 21cm + noise:

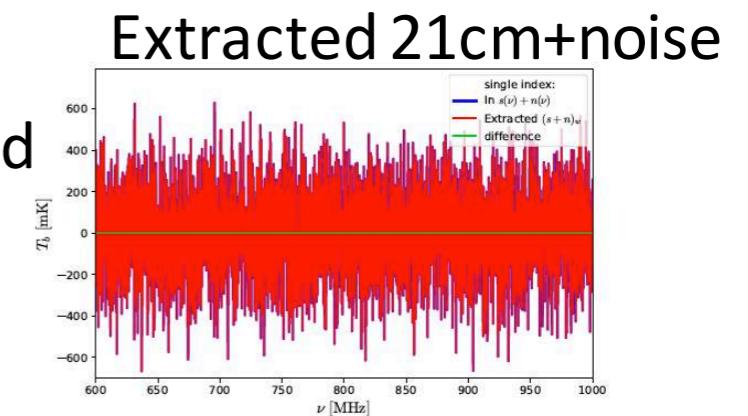
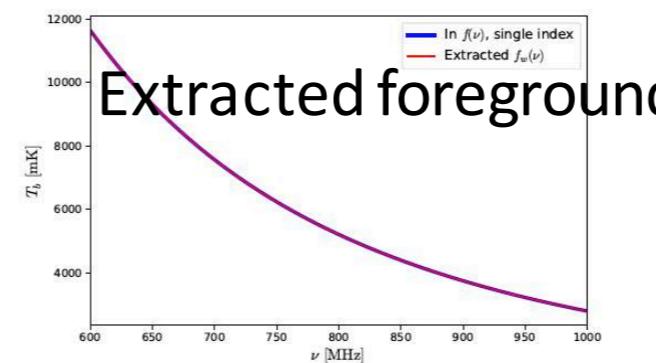
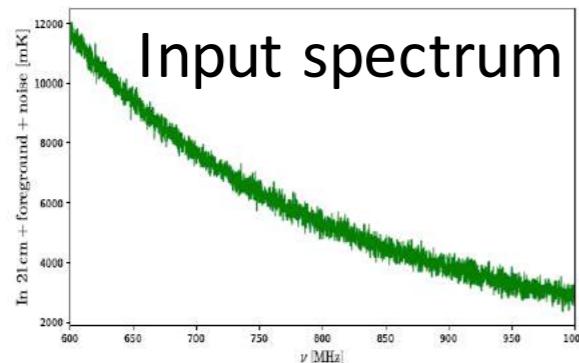
$$\mathbf{W}_v = \mathbf{I} - \mathbf{W}_v^f$$

- Filtering in angular domain

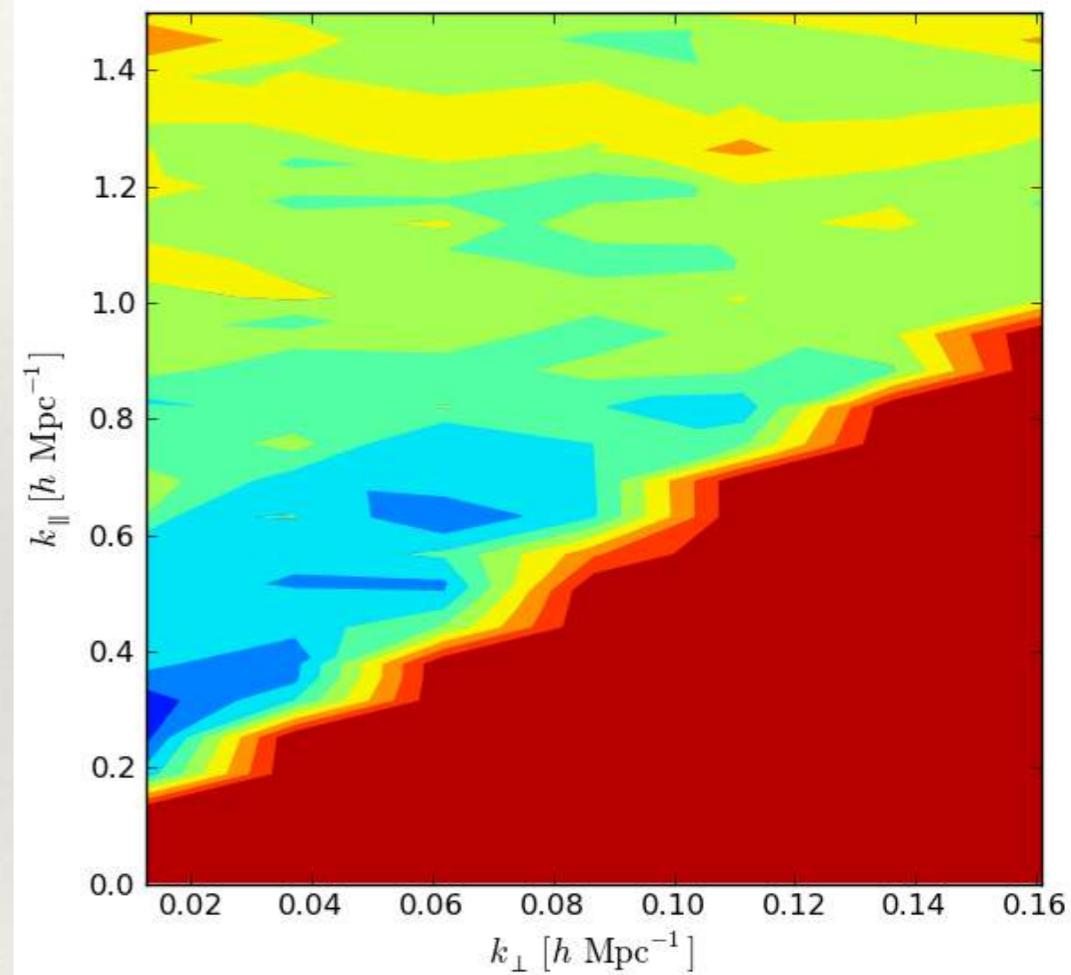
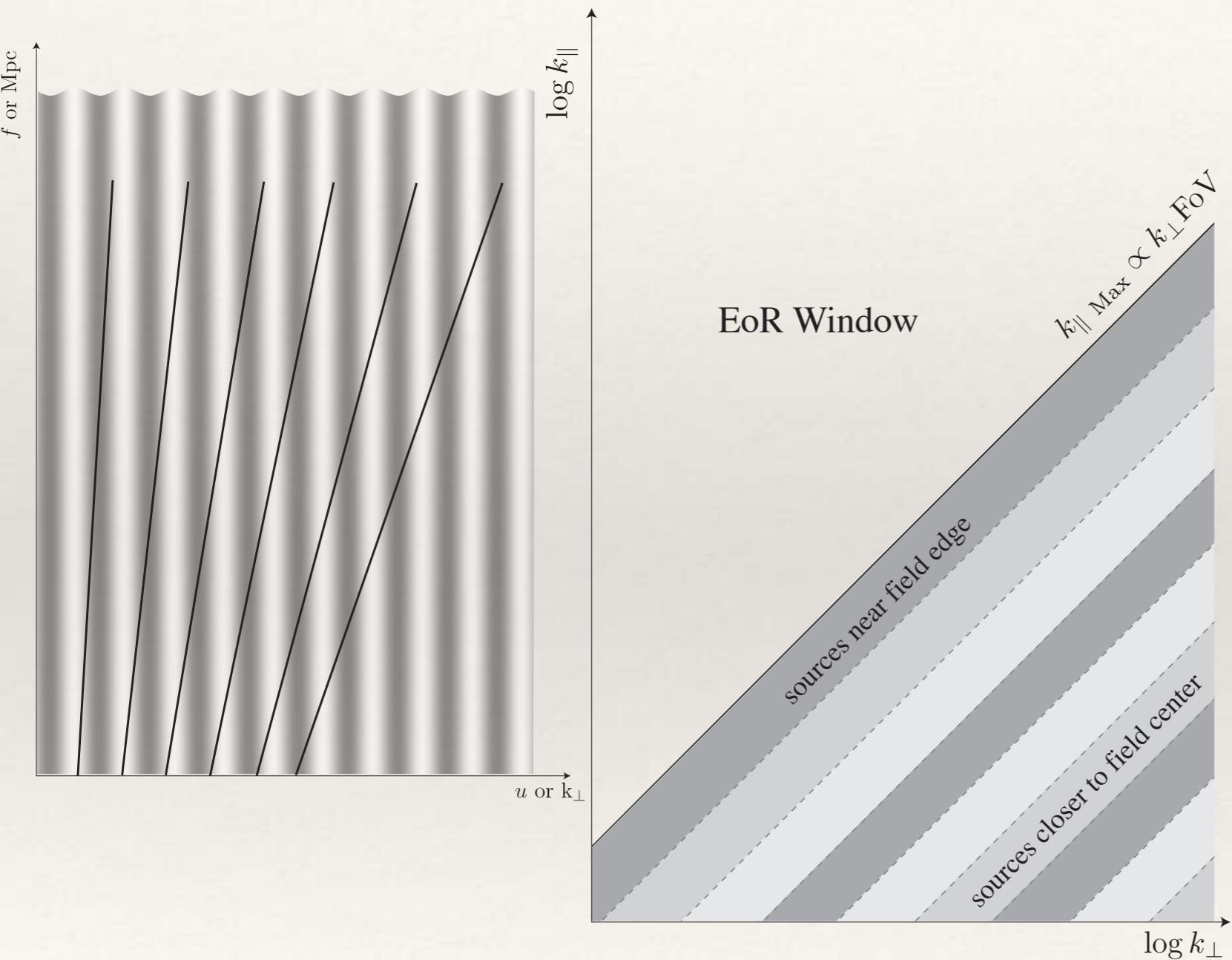
- 2D Wiener filter designed to extract the 21cm signal

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

- 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

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

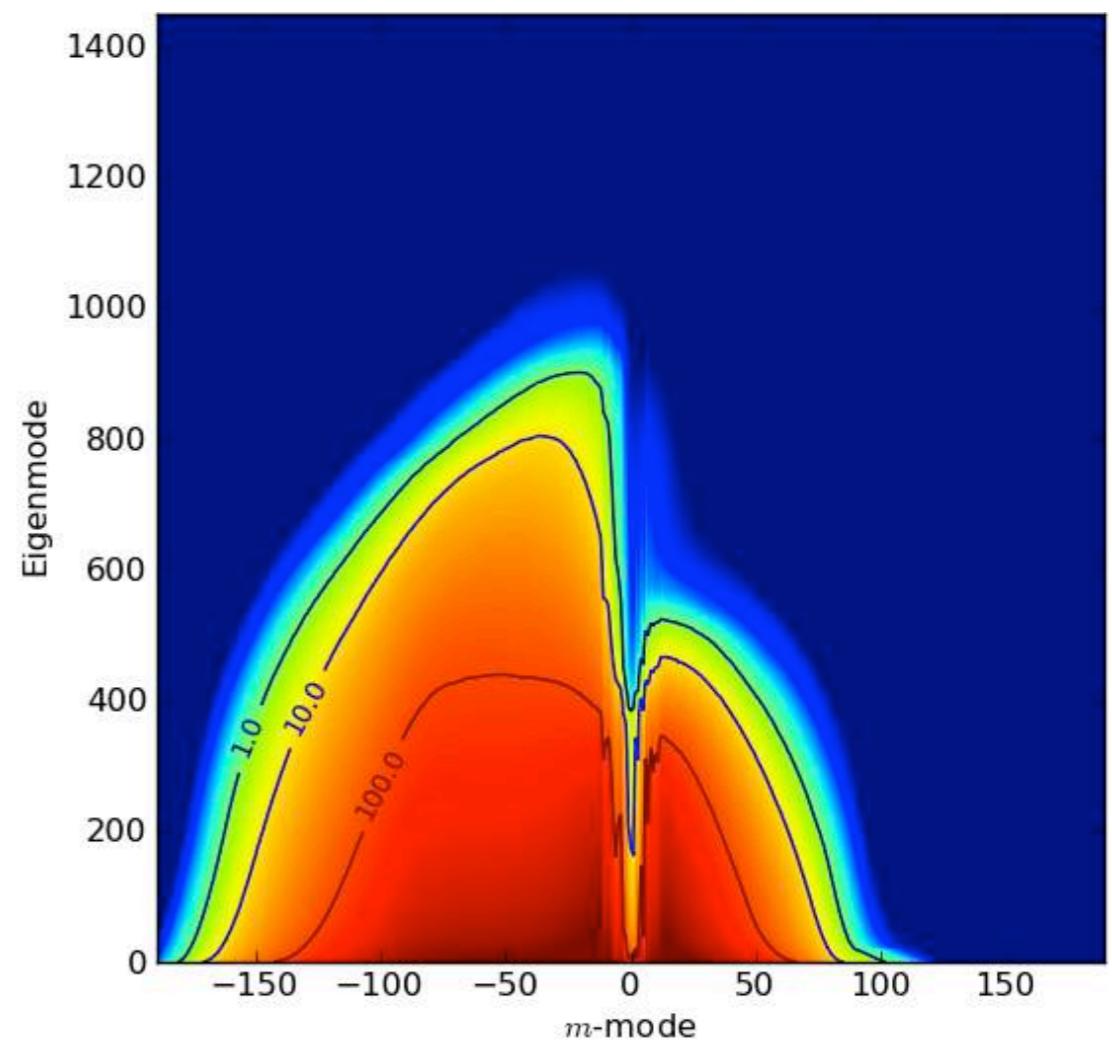
- Jointly diagonalise both matrices (eigenvalue problem)

Karhunen-Loève (KL) Transform: $\mathbf{Sx} = \lambda \mathbf{Fx}$ (3)

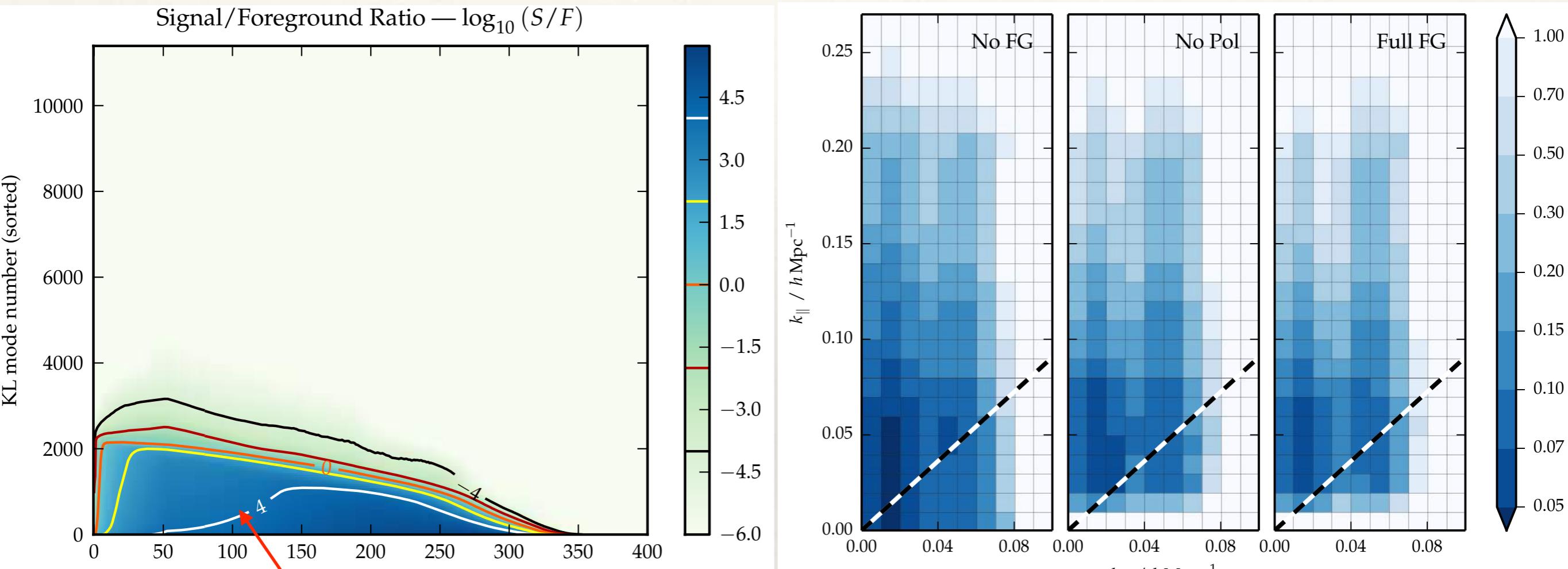
- Gives a new basis, where we expect that all modes are uncorrelated. Eigenvalue λ_i gives ratio of signal to foreground variance for mode i .

cf. Bond 1994, Vogeley and Szalay 1996

Signal/Foreground Spectrum



Modes « propres » en rapport signal/bruit



Dominé par les avant-plans

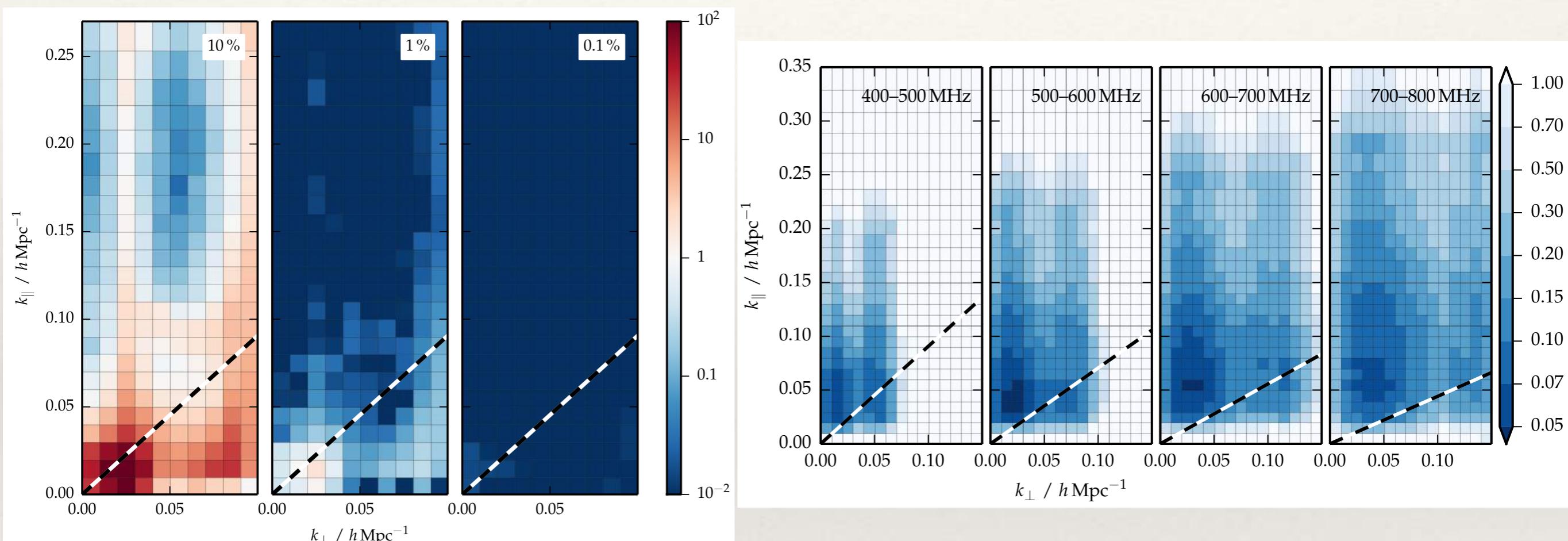
rapport S/B ds le plan (k_{\perp}, k_{\parallel}) pour 3 cas
(sans avant-plan, avec, +polar)

Prise en compte de la polarisation

Shaw et al. 2014, arXiv:1302.0327

Shaw et al. 2015, arXiv:1401.2095

Imperfections instrumentales



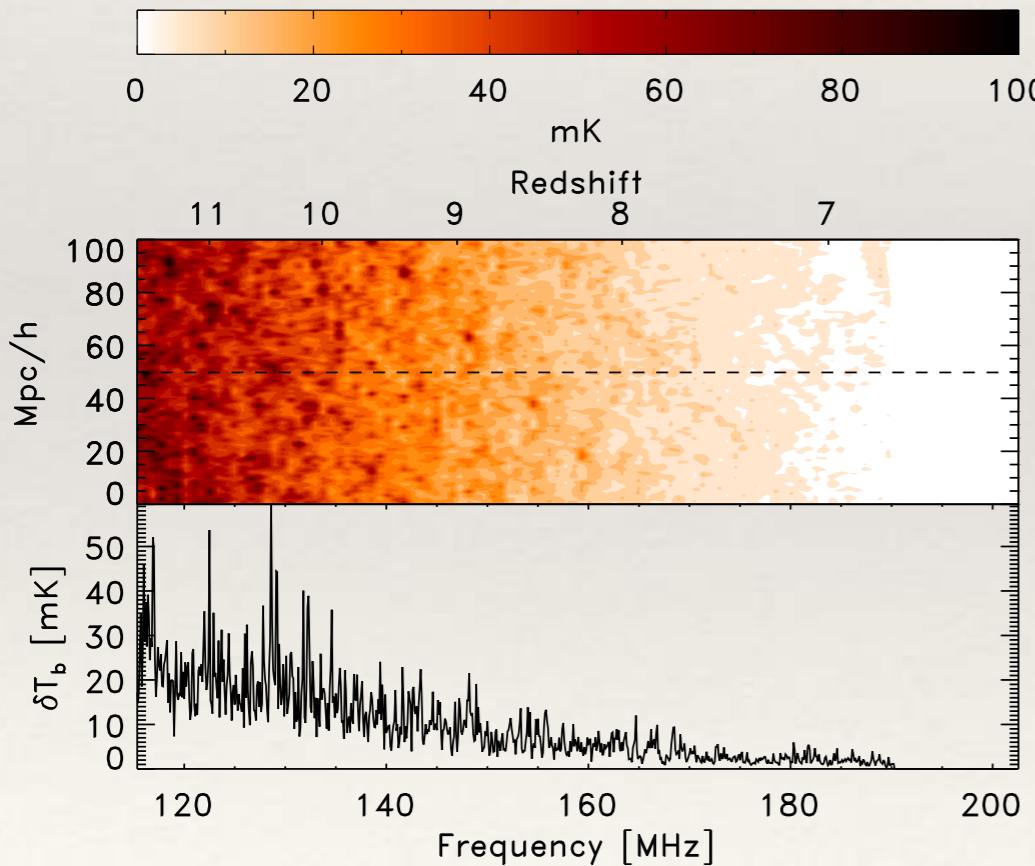
Effet systématique dû aux erreurs
sur les gains complexes

Gain avec la résolution instrumentale

EoR signal & foregrounds

Foreground simulations for the LOFAR - Epoch of Reionization Experiment

V. Jelić^{1*}, S. Zaroubi¹, P. Labropoulos¹, R.M. Thomas¹, G. Bernardi¹,
M.A. Brentjens², A.G. de Bruyn^{1,2}, B. Ciardi³, G. Harker¹, L.V.E. Koopmans^{2,3,0},
V.N. Pandey¹, J. Schaye⁴, S. Yatawatta¹



Signal EoR

Jelic et al. 2008, arXiv:0804.1130

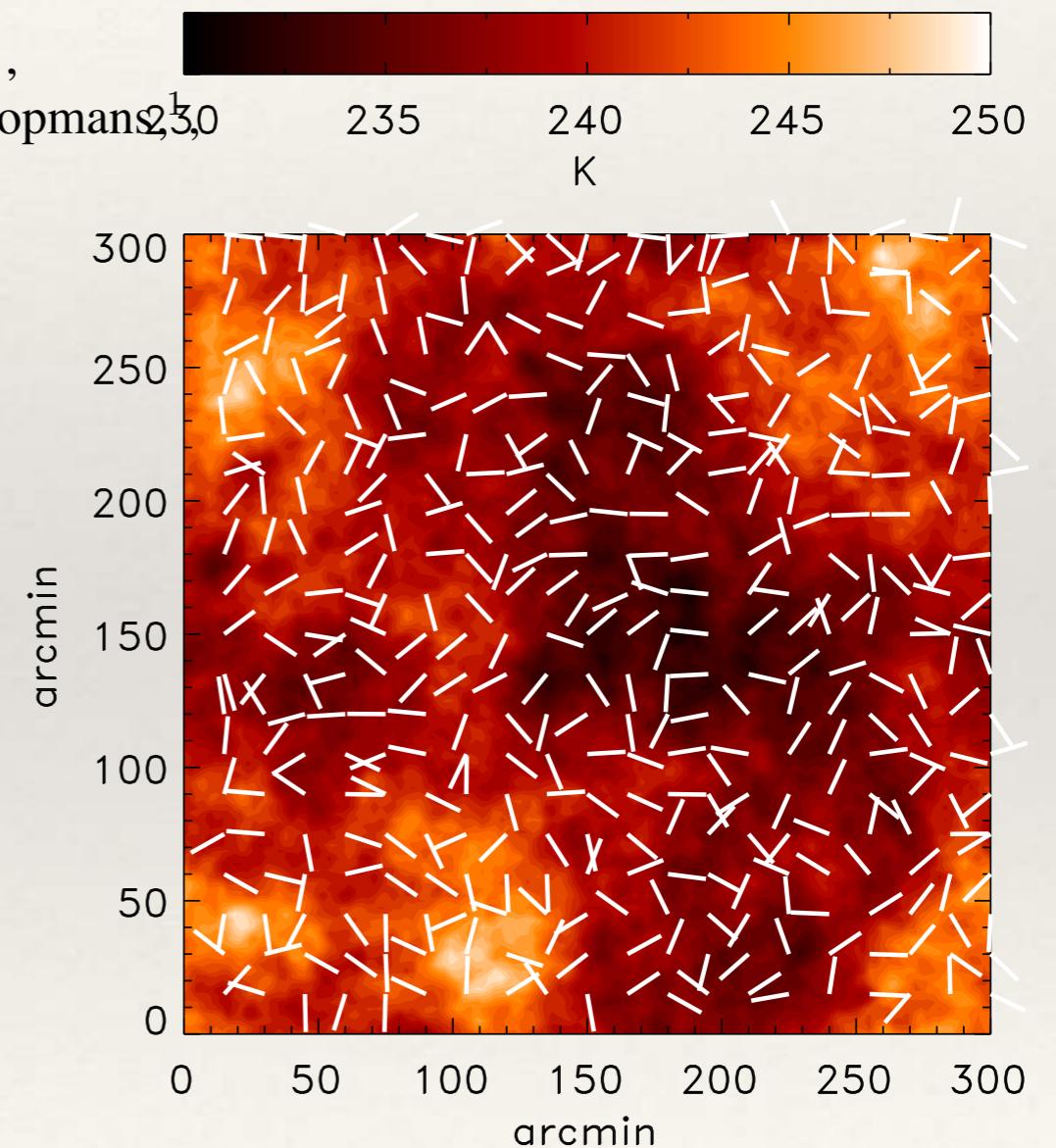
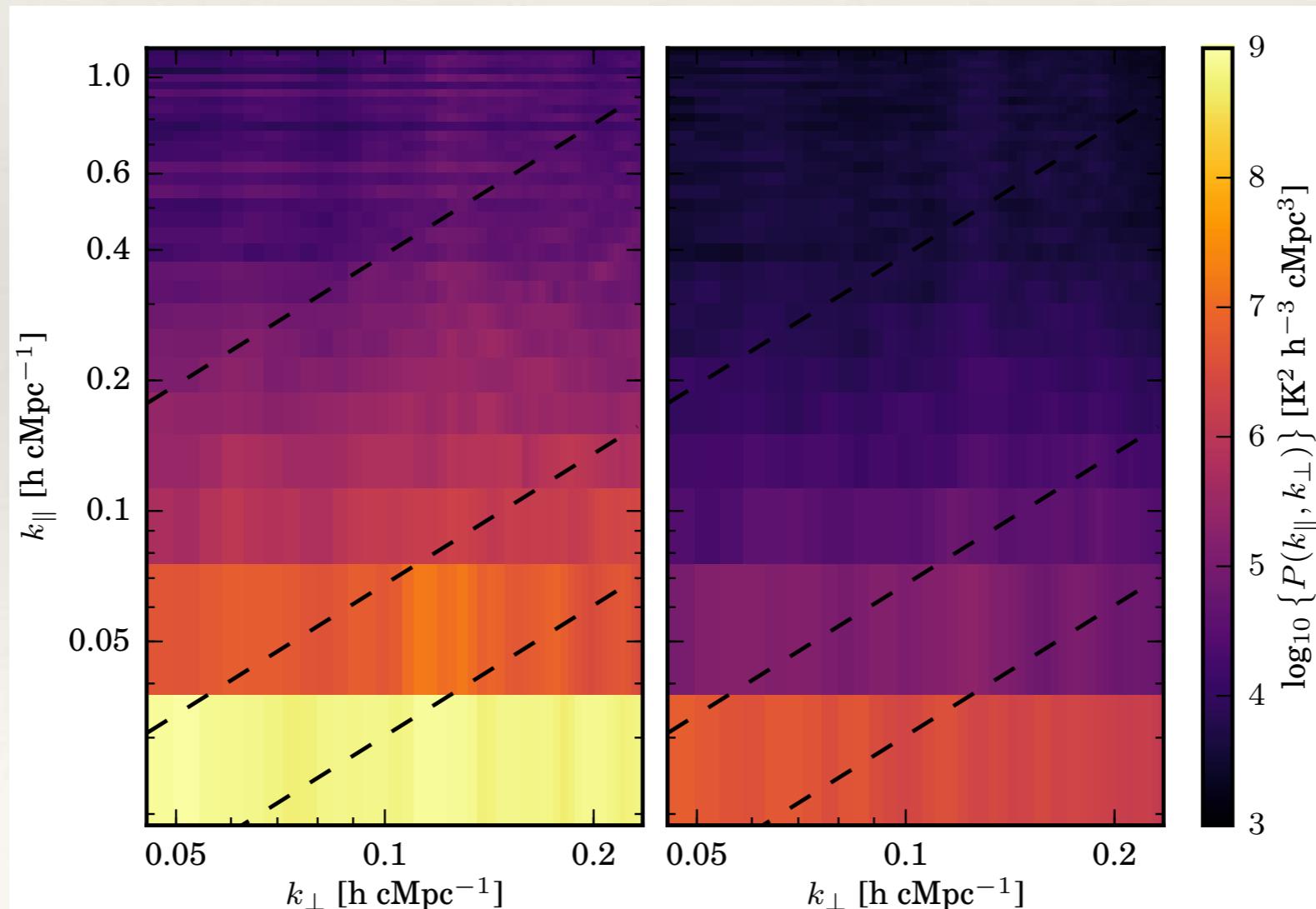


Figure 7. Simulated 120 MHz map of polarized intensity (I_p) of diffuse Galactic synchrotron emission, and polarization angle (white lines). The angular size of the map is $5^\circ \times 5^\circ$, with $\sim 0.6'$ resolution.

A.H. PATIL¹, S. YATAWATTA^{1,2}, L.V.E. KOOPMANS^{1,†}, A.G. DE BRUYN^{2,1}, M. A. BRENTJENS², S. ZAROUBI^{1,11}, K. M. B. ASAD¹, M. HATEF¹, V. JELIĆ^{1,8,2}, M. MEVIUS^{1,2}, A. R. OFFRINGA², V.N. PANDEY¹, H. VEDANTHAM^{9,1}, F. B. ABDALLA^{7, 13}, W. N. BROUW¹, E. CHAPMAN⁷, B. CIARDI⁴, B. K. GEHLOT¹, A. GHOSH¹, G. HARKER^{3,7,1}, I. T. ILIEV¹⁰, K. KAKIICHI⁴, S. MAJUMDAR¹², M. B. SILVA¹, G. MELLEMA⁵, J. SCHAYE⁶, D. VRBANEĆ⁴, S. J. WIJNHOLDS²

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 $\Delta_I^2 = (56 \pm 13 \text{ mK})^2$ ($1-\sigma$) excess variance and a best $2-\sigma$ upper limit of $\Delta_{21}^2 < (79.6 \text{ mK})^2$ at $k = 0.053 \text{ h cMpc}^{-1}$ 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.

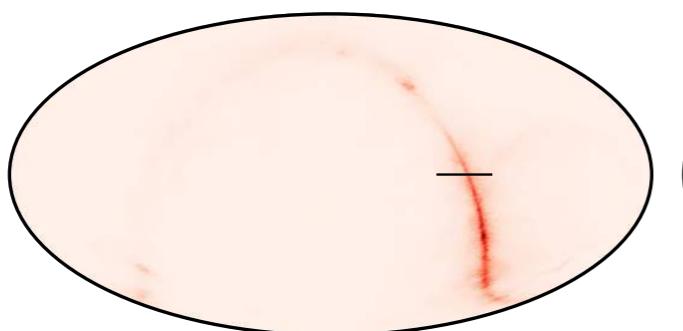


De belles perspectives avec
LOFAR, HERA, SKA
pour le sondage de l'Epoque de Réionisation

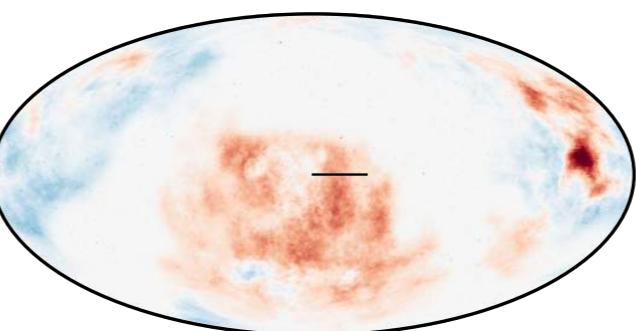
Peut-être aussi une fenêtre complémentaire pour la
cosmologie/Energie noire, avec CHIME, Tianlai,
HIRAX, et peut-être PUMA

Merci de votre attention

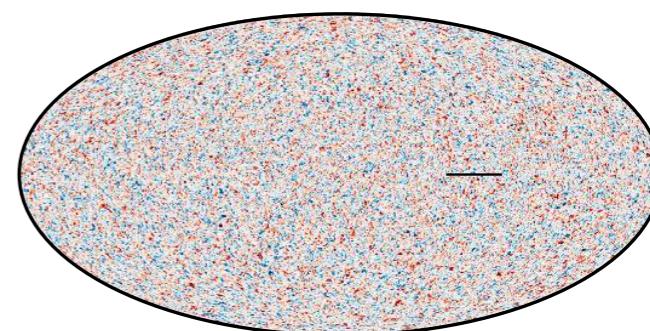
Unpolarised Foreground



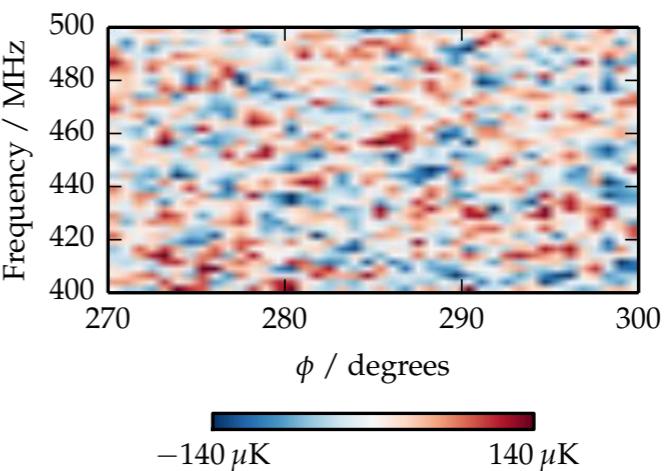
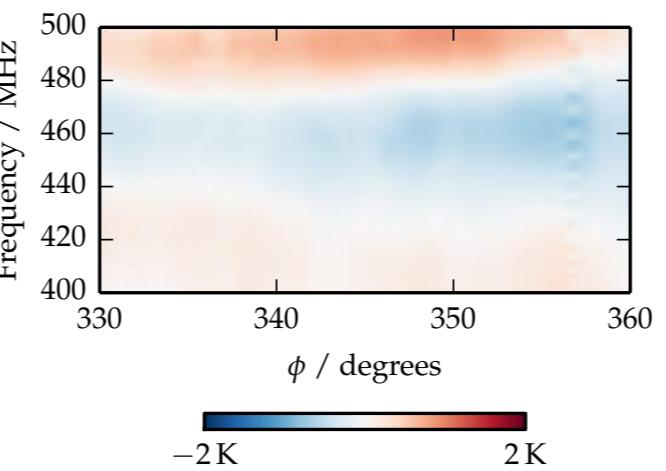
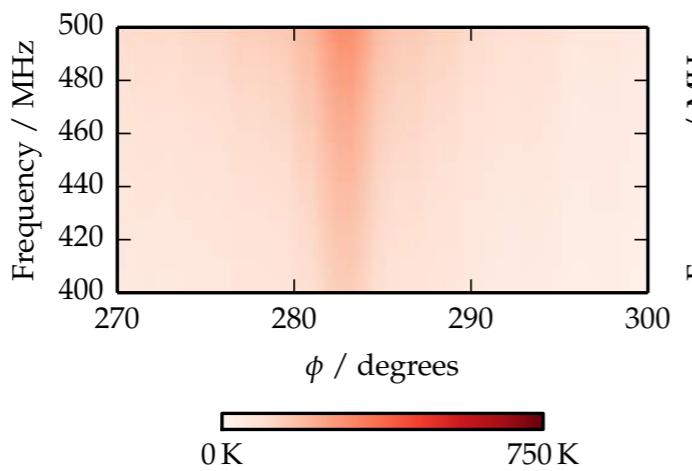
Polarised Foreground (Q)



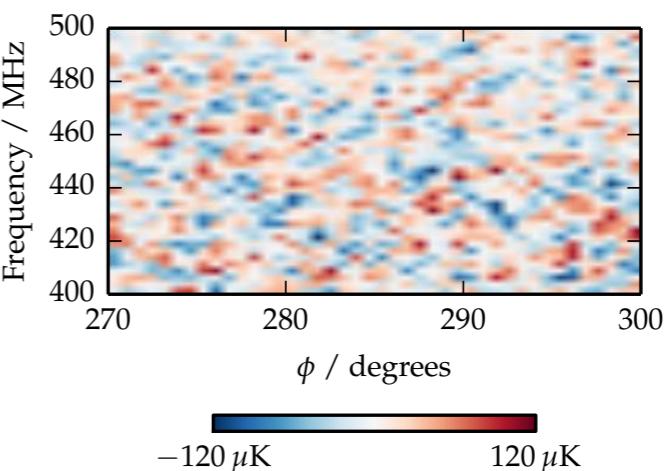
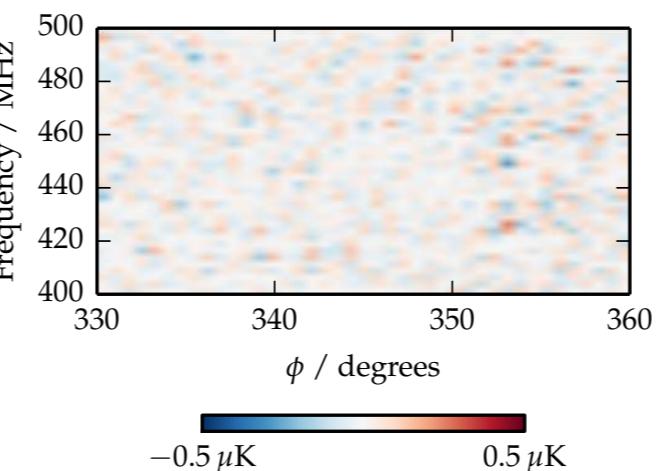
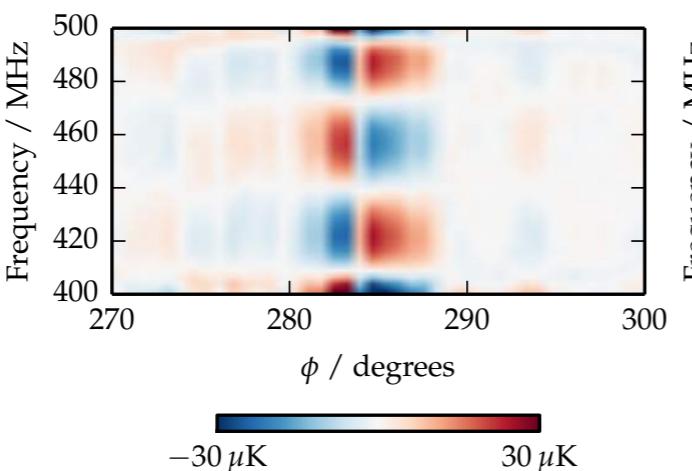
21cm Signal



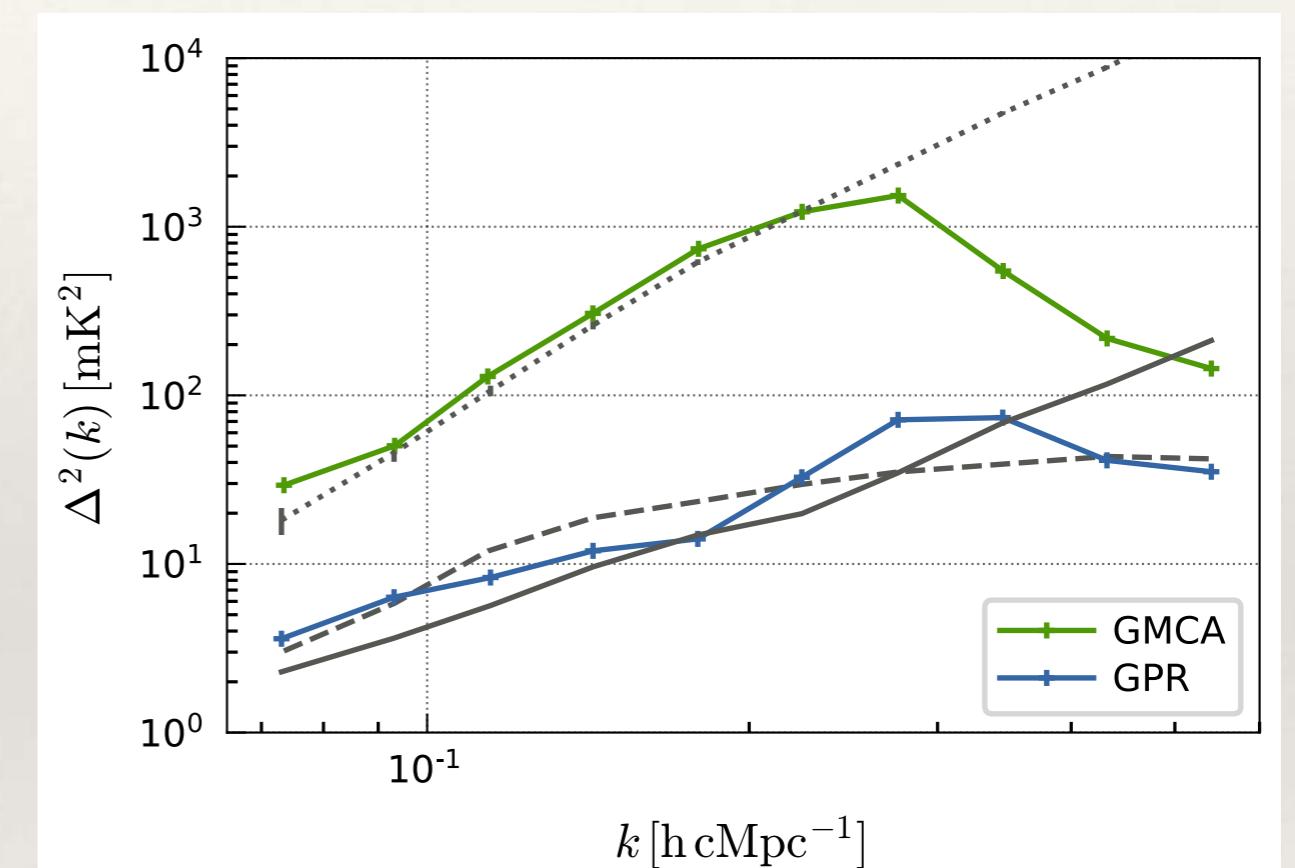
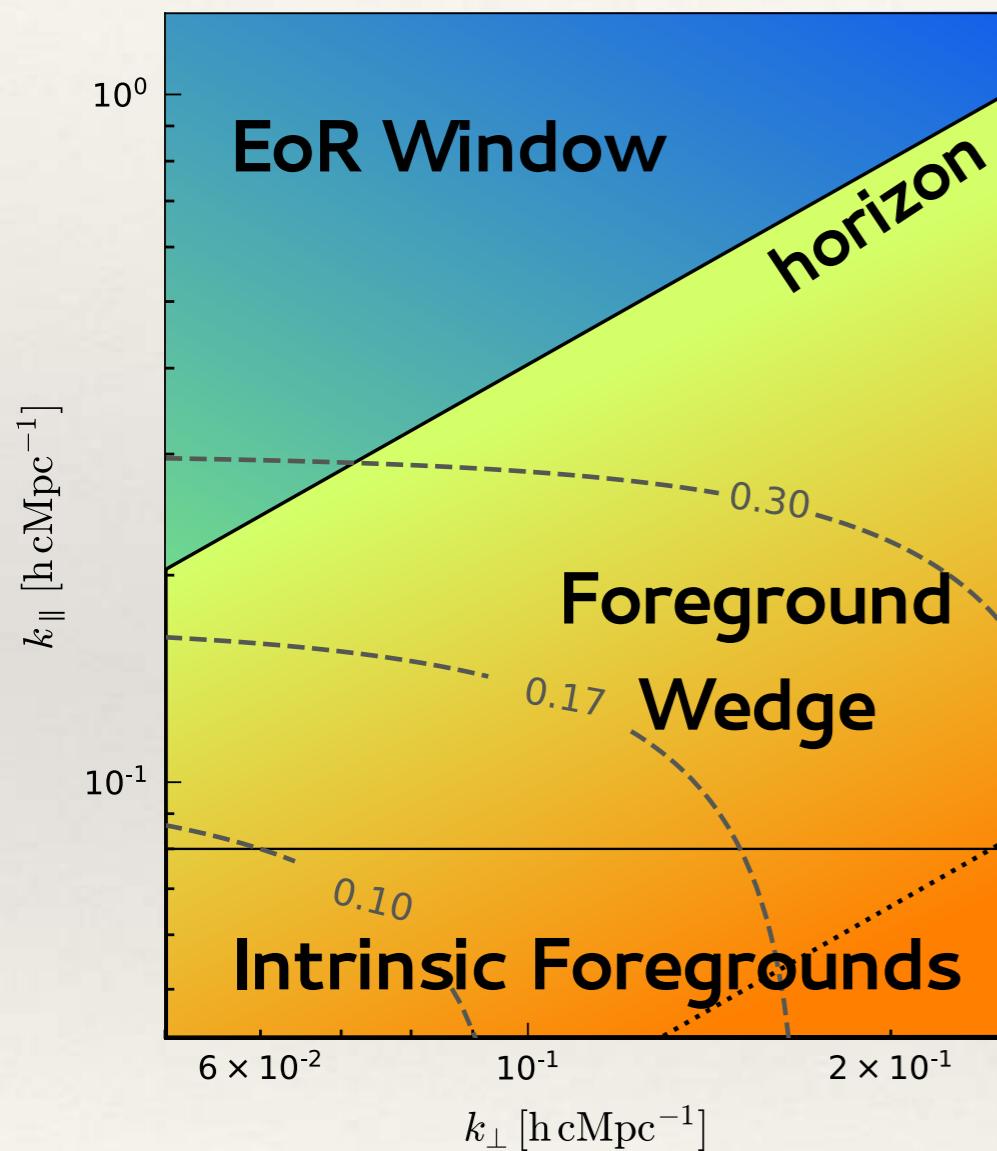
Simulated Sky



Foreground Filtered

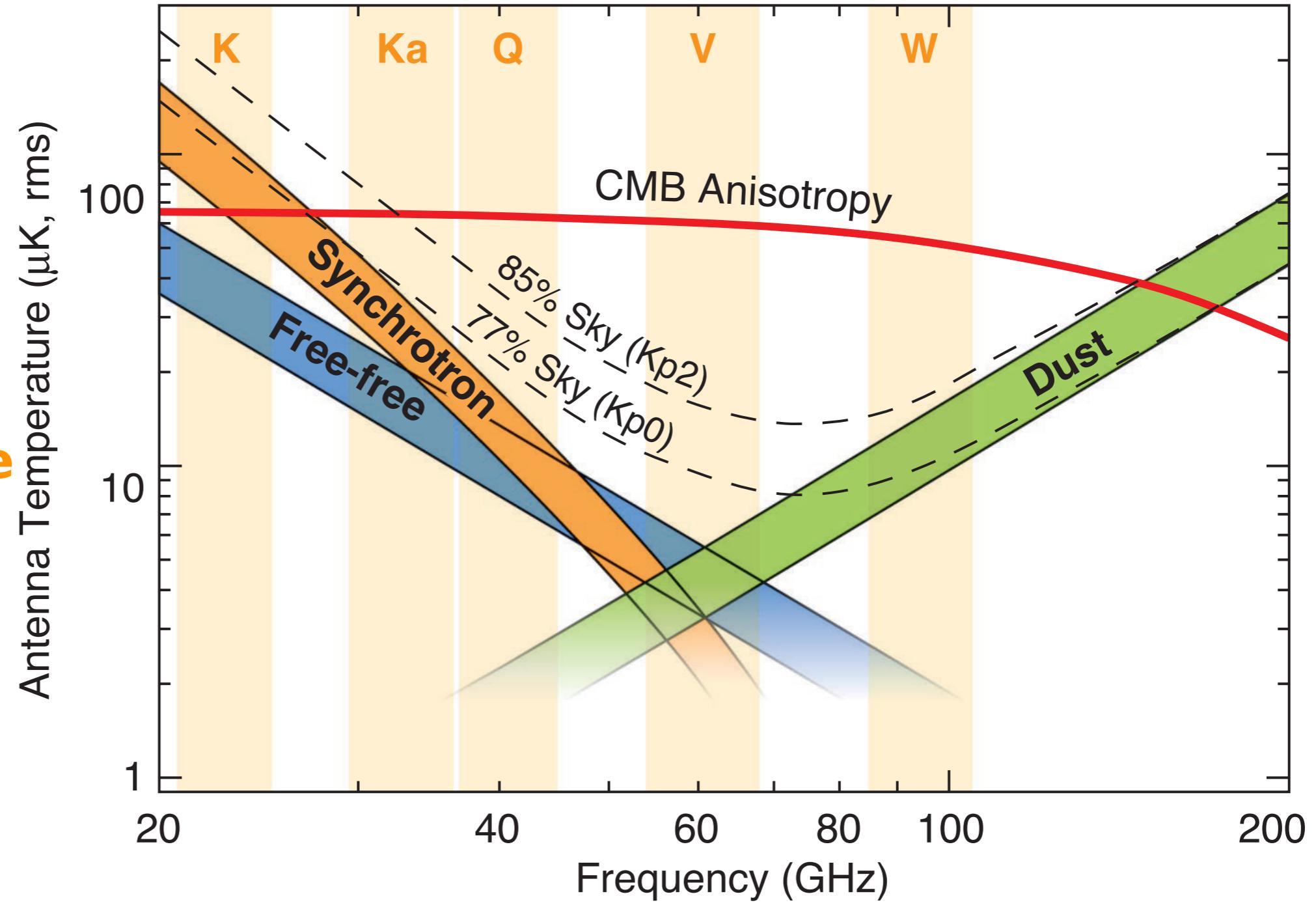


EoR signal & foregrounds



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

↓ GHz



Spectre des anisotropies
des avant-plans

Bennet et al 2003, ApJS 148