



IN2P3  
Les deux infinis



INSU  
Observer & comprend

# 21cm Intensity Mapping PAON-4 and TIANLAI

Steve Torchinsky  
Observatoire de Paris, Nançay

On behalf of the BAORadio Team

Journées PNCG, Nice, 15-17 déc 2015

# BAORadio

## LAL - IN2P3/CNRS

R. Ansari  
J.E. Campagne  
M. Moniez  
A.S. Torrento  
D. Breton  
C. Beigbeder  
T. Cacaceres  
  
D. Charlet  
Q. Huang  
B. Mansoux  
C. Pailler  
M. Taurigna  
J. Zhang

## IRFU - CEA

C. Magneville  
C. Yèche  
J. Rich  
J.M. Legoff  
  
P. Abbon  
E. Delagnes  
H. Deschamps  
C. Flouzat  
P. Kestener

## Observatoire de Paris

P. Colom  
J.M. Martin  
J. Borsenberger  
J. Pezzani  
F. Rigaud  
S. Torchinsky  
C. Viou

# LSS & BAO à 21 cm

- De manière analogue aux relevés optiques :
  - ≡ Identification des sources HI (21 cm), détermination de la position angulaire position et le redshift (raie à 21 cm) - Calcul de la fonction de corrélation à 2 points ou le spectre de puissance  $P(k)$  à partir du catalogue d'objets.
- Ou similaire aux observations du fond diffus (CMB) :
  - ≡ Cartographie de l'intensité d'émission (température de brillance) HI (21 cm) -  $T_{21}(\alpha, \delta, z)$  - Soustraction des avant-plans (synchrotron...), détermination du spectre  $P(k, z)$  sur les cubes de données 21 cm.

# LSS en radio avec des galaxies

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

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

**z=1:  $5\sigma$  detection in 1 hour  $\rightarrow 1 \text{ km}^2$  collecting area**

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

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

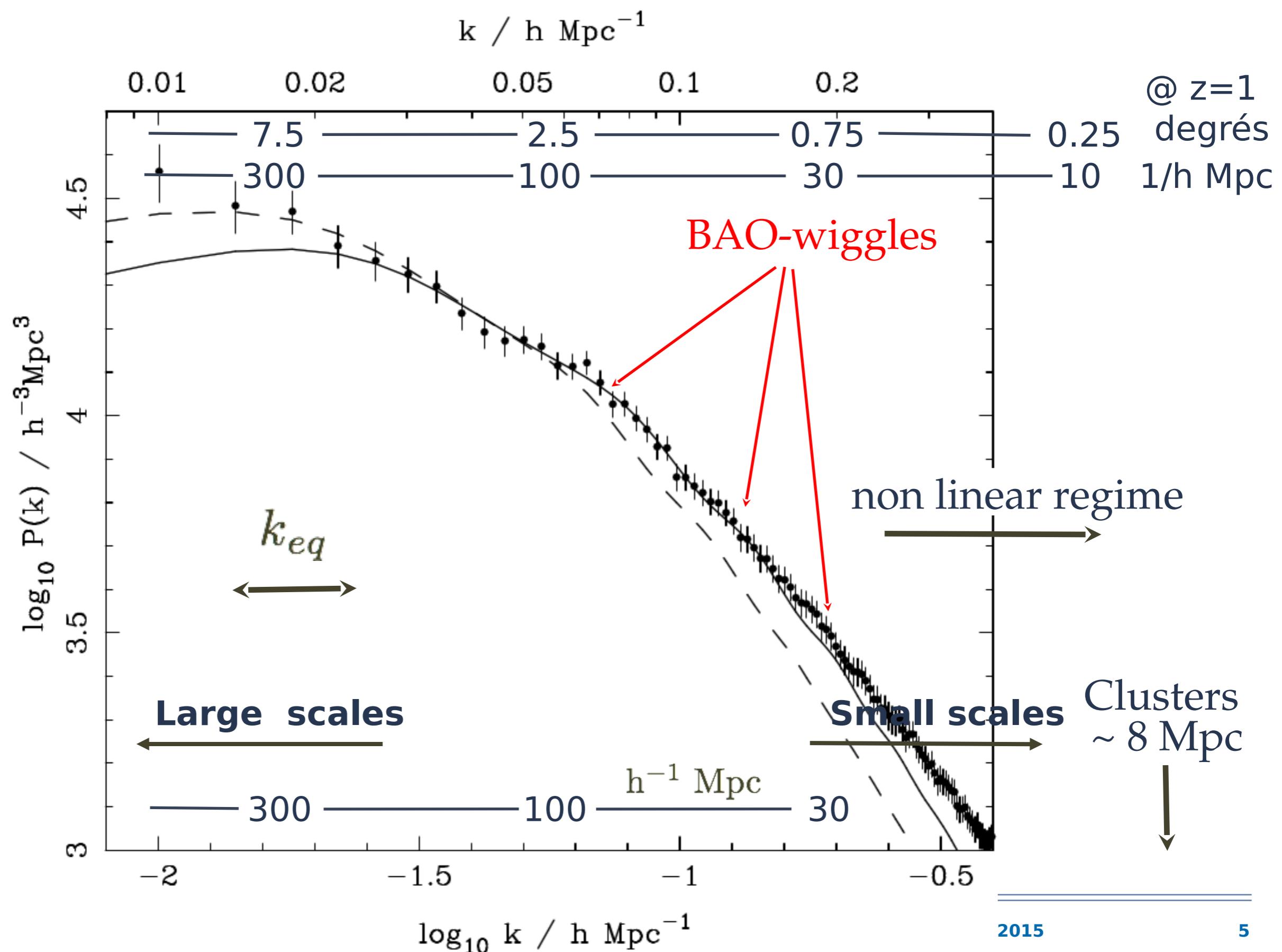
A ( $\text{m}^2$ )	Tsys (K)	Slim ( $\mu\text{Jy}$ )
5000	50	66
5000	25	33
100000	50	3,5
100000	25	1,7

z	S21 ( $\mu\text{Jy}$ )
0,25	175
0,50	40
1,0	9,6
1,5	3,5
2,0	2,5

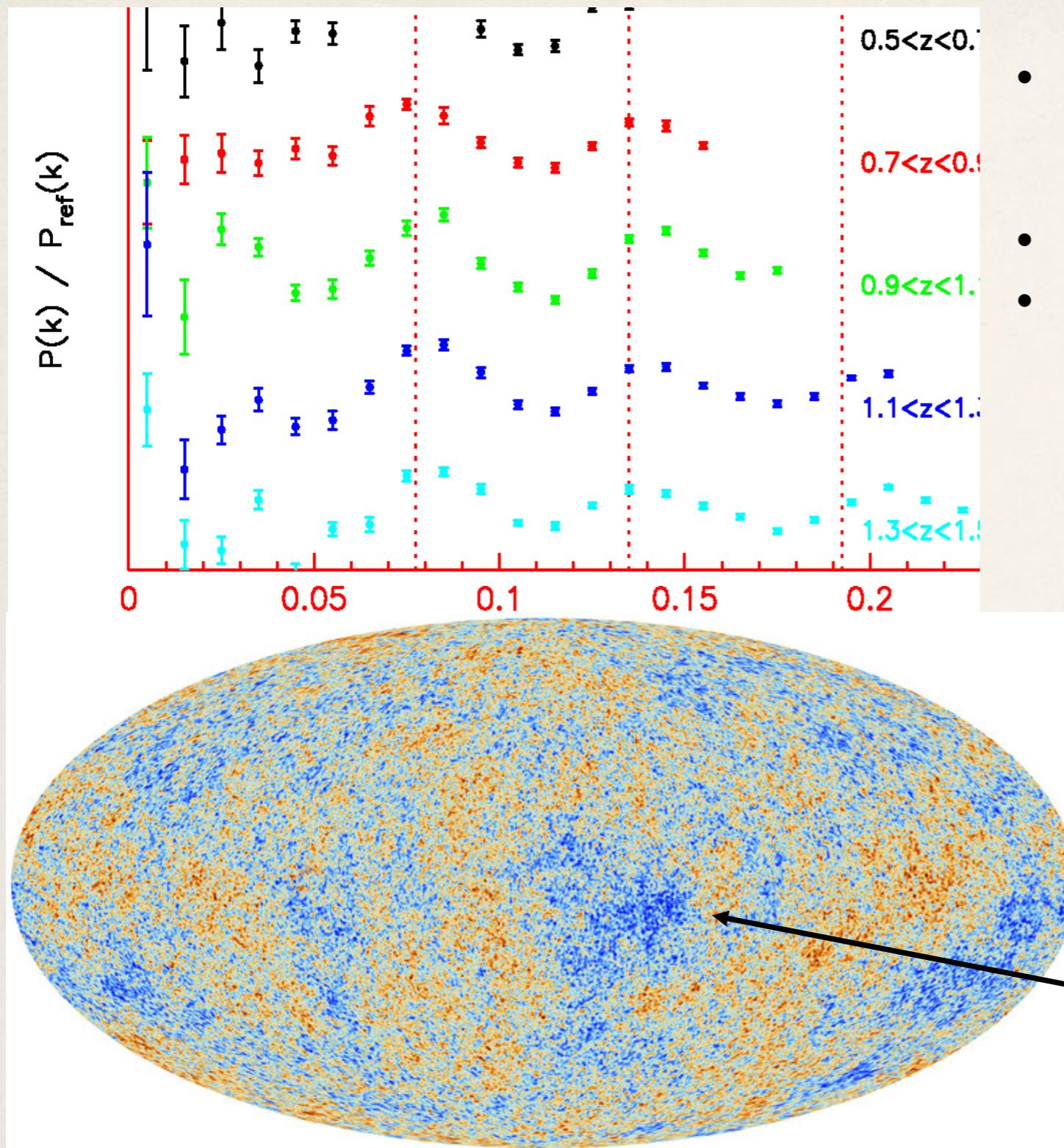
$> 100\,000 \text{ m}^2 \rightarrow \text{SKA} !$

# SDSS - Percival et al. ApJ, astro-ph/0608636

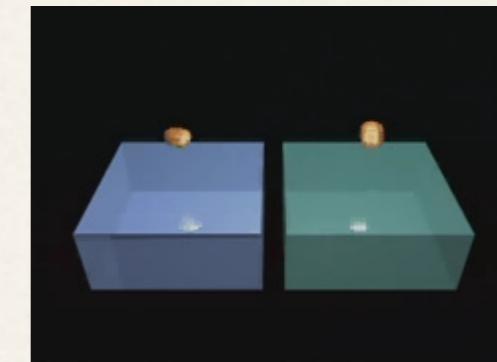
BAO scales  $\gtrsim 0.2$  degree



# Baryonic Acoustic Oscillations



- Improve signal confidence by measuring wiggles in separate redshift bins
- SKA: A catalog of a billion galaxies
- Position and redshift measured simultaneously



There are fluctuations at all scales but there is a preferred scale of around 1 deg.

# Observations à 21 cm Comparaison avec les techniques optiques

- ⊕ La raie à 21 cm: unique motif spectral en bande L (autour ~GHz)  
→ observations spectro-photométrique
- ⊕ Band: ~ 100 MHz ... 1500 MHz -  $\nu = f(z)$ , z: 0 ... 10  
*1420 MHz @ z=0 , 946 MHz @ z=0.5 , 720 @ z=1 , 284 @ z=5, 129 @ z=10*
- ⊕ Les instruments limités par la limite de diffraction:  
*700 MHz: D=100 m → ~20' , D=1km → ~2' , D=100 km → ~1'' , 2' → 1 Mpc @ z = 1*
- ⊕ Mesure d'intensité en optique, amplitude & phase in radio;  
Imagerie/CCD en optique, interférométrie et spectroscopie en radio
- ⊕ Bruit instrumental (ro-noise <5 e) souvent négligeable en optique,  
dominant en radio ( $T_{sys} \sim 20-50$  K)
- ⊕ Pollution lumineuse (humaine) / émissions atmosphériques en optique / pollution électromagnétique (RFI) d'origine terrestre (/humaine) en radio

# LSS/BAO/RSD à 21 cm: Cartes 3D T21( $\alpha, \delta, z$ )

- Cartographie 3D de la distribution de l'hydrogène neutre par la mesure du spectre d'émission totale radio en bande L sans identification des sources
- Une résolution angulaire modeste (10-15 arcmin) est suffisant
- Nécessite un grand champ de vue (FOV) et une large bande (BW) instantanés
- Réseau interférométrique dense à base de petits réflecteurs (haute sensibilité à bas k) ( $\rightarrow$  grand FOV)

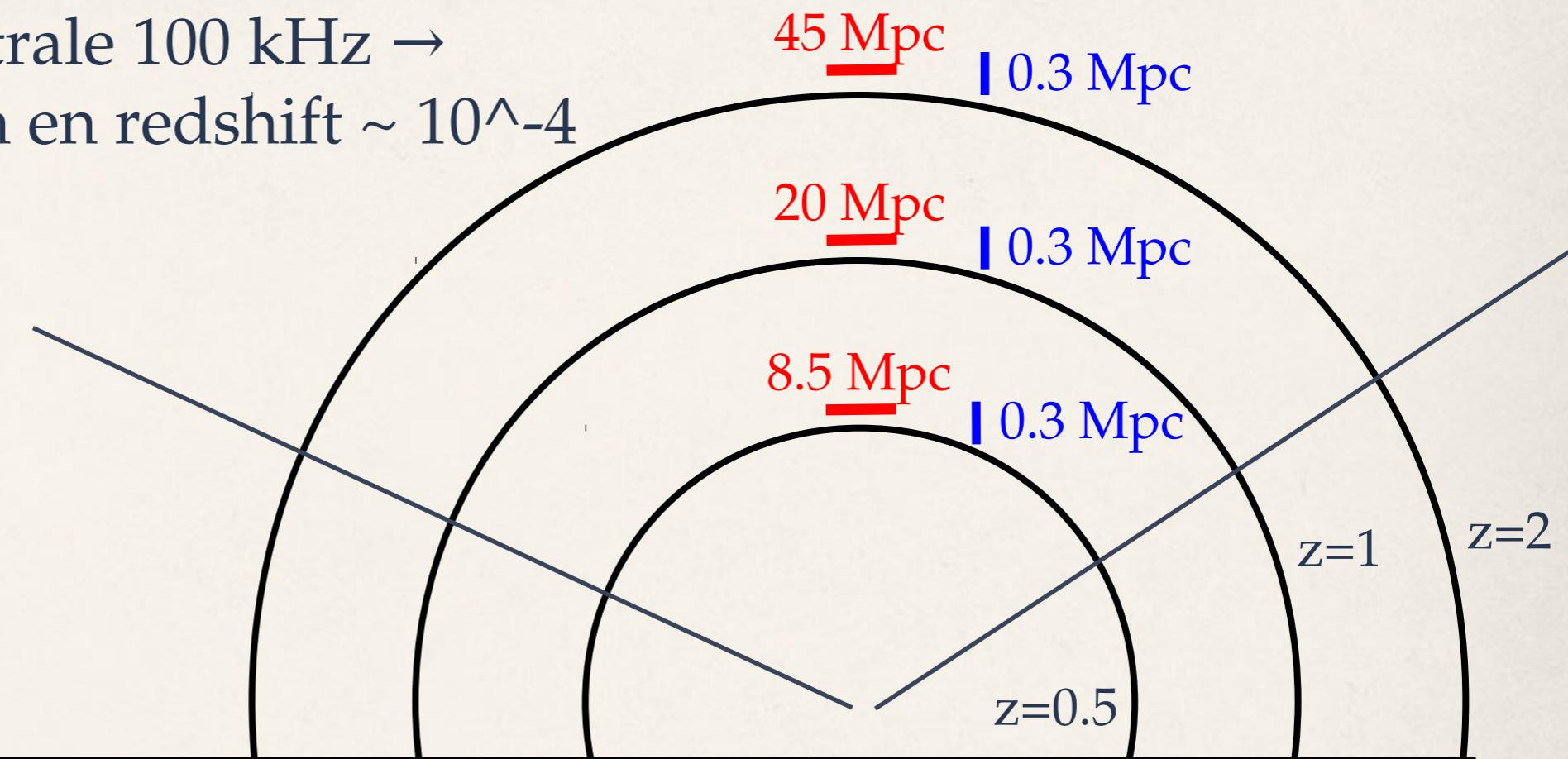
≡ Bruit instrumental / environnemental ( Tsys )

≡ Avant-plans : synchrotron et sources radio

- Peterson, Bandura & Pen (2006)
- Chang et al. (2008) arXiv:0709.3672
- Ansari et al (2008) arXiv:0807.3614
- Wyithe, Loeb & Geil (2008) arXiv:0709.2955
- Peterson et al (2009) arXiv:0902.3091
- Ansari et al (2012) A&A arXiv:1108.1474

Réseau de  $L=100$  m  $\rightarrow$  résol. angulaire  
 $\delta\theta \sim \lambda/L$ , se détériore avec le redshift z

résolution spectrale 100 kHz  $\rightarrow$   
 excellente résolution en redshift  $\sim 10^{-4}$

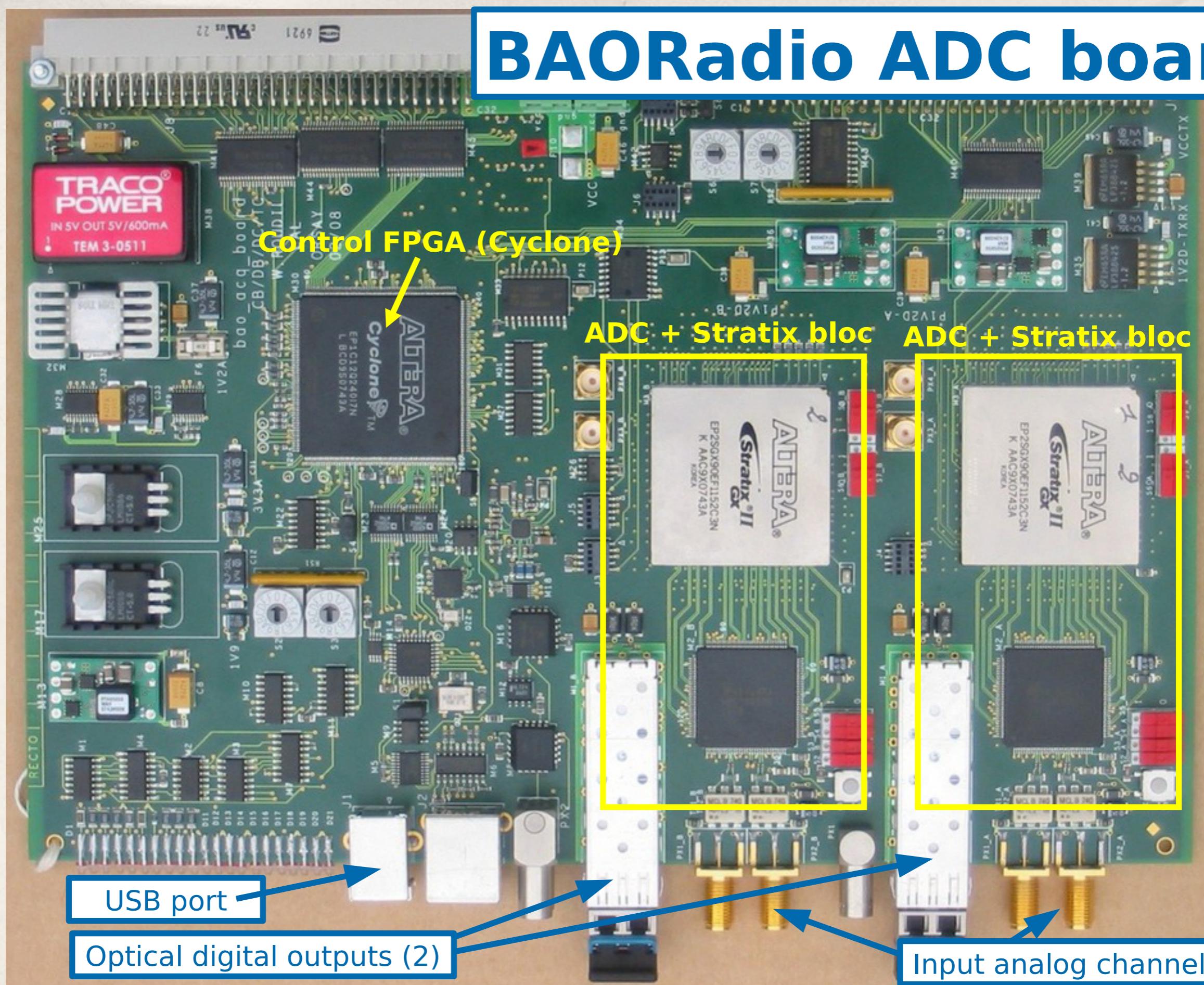


z	$\delta\theta$	dLOS (Mpc)	H	$\delta d_{  }$ (Mpc)	$\delta d_{\perp}$ (Mpc)
0,5	15'	1945	90	8,5	$\sim 0.3$
1	20'	3400	120	20	$\sim 0.3$
2	30'	5320	200	45	$\sim 0.3$
3	40'	6320	300	75	$\sim 0.3$

# BAORadio historique

- 2007: début du projet BAORadio
- LAL (IN2P3/CNRS), Irfu (CEA), Observatoire de Paris
- 2007-2009: Développement de la chaîne BAORadio (électronique/informatique) - Tests à nançay
- 2009-2010: Tests sur le prototype du CRT à Pittsburgh
- 2011-2012: FAN, Observations HICluster, contacts avec le NAOC
- 2012-2014: PAON, Tianlai
- 2015-2016: NEBuLA, PAON4, Tianlai
- Soutien financier: IRFU, CNRS/P&U, P2I, Obs. de Paris, LAL, PNCG

# BAORadio ADC board

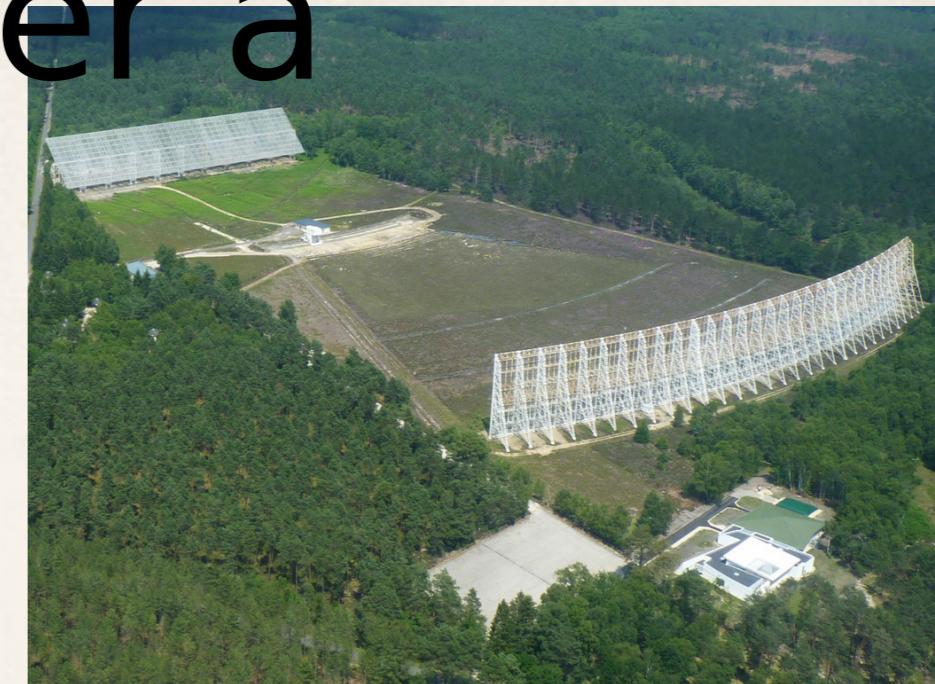


# CRT (CMU, Pittsburgh)



BAORadio @ CRT-Pittsburgh  
Nov 2009

# Programme HIcluster à Nançay



Observation de quelques amas proches  
(A85, A1205, A2440,  $z \lesssim 0.1$ )

Observation au RT en parallèle avec le système BAORadio et l'auto-correlateur standard ACRT

Total  $\sim 10\text{-}20$  heures/cible - observations réparties sur  $\sim$  une année

Calibration, nettoyage RFI, analyse des spectres

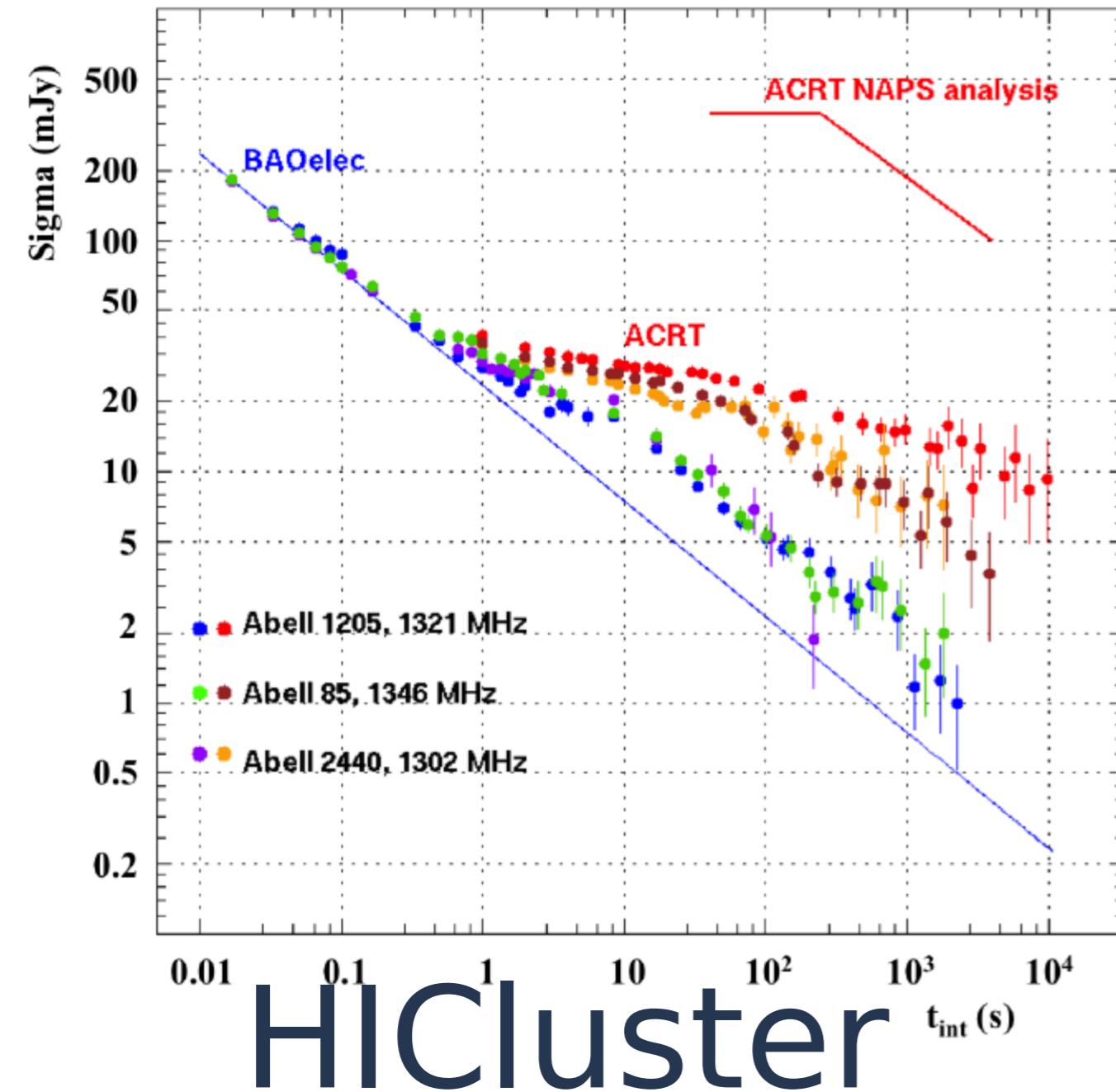
$\sim 150$  TO de données traitées au CC-IN2P3 (transfert par iRods)

Niveau de sensibilité de  $\sim mK$  sur une large bande

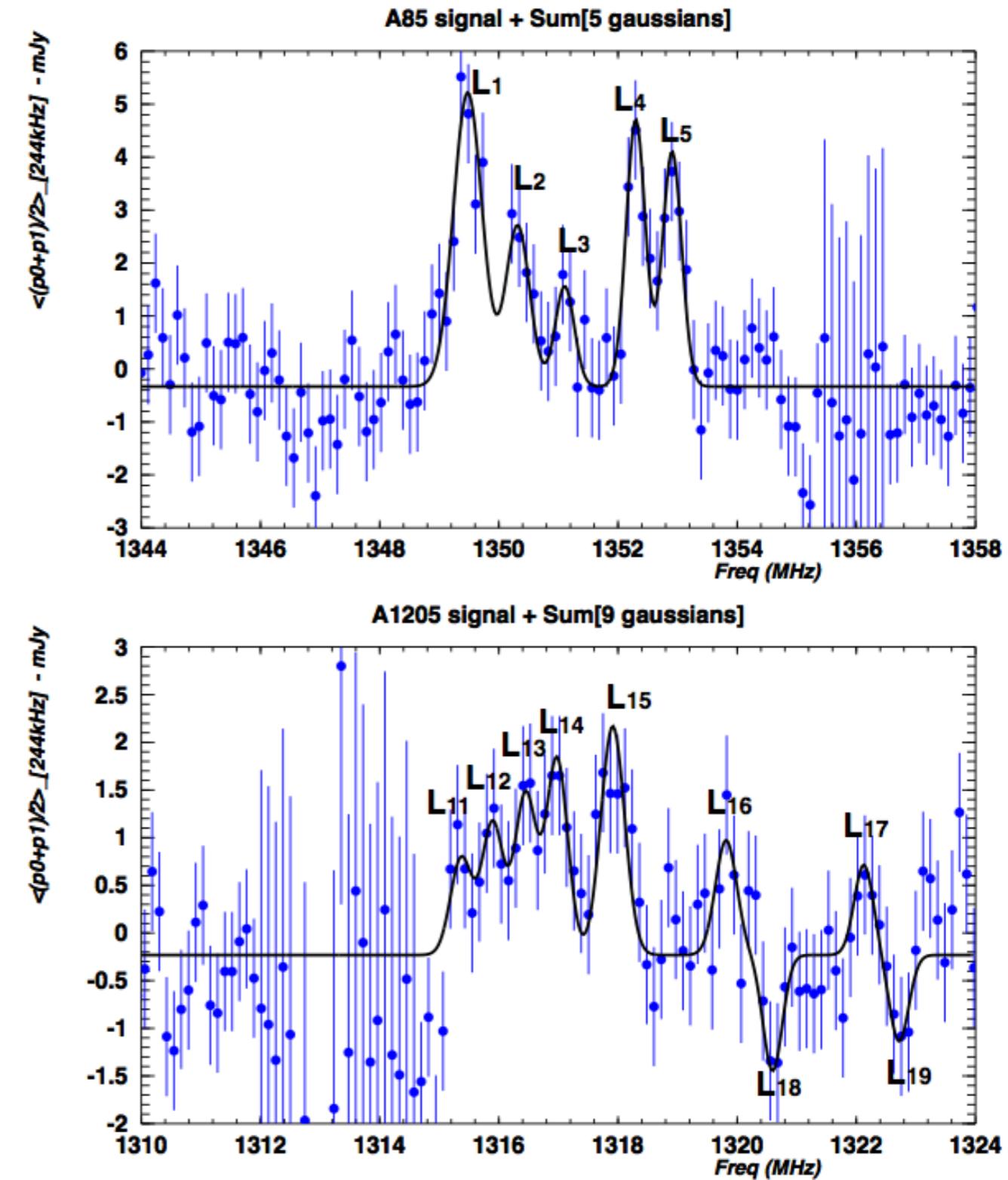
Détection/mesure du signal HI sur A85 et A1205

# Courbe de sensibilité (radiometer curve) HI-Cluster, BAORadio & NRT correlator

Signal HI A85 / A1205



Ansari et al. (2015) - Exp. Astronomy  
arXiv:1505:02623



# Interféromètre PAON

- ⊕ PAON : PAraboles à l'Observatoire de Nançay
- ⊕ PAON-4 : 4 réflecteurs D=5m, réseau dense, observation mode transit
- ⊕ Surface totale  $\sim 75 \text{ m}^2$ , 8 = 4 x 2 (pol) récepteurs , 36 visibilities  $\sim 2 \text{ GBytes/s}$  de flot de données maximum
- ⊕  $38 \text{ S} < \text{Elevation} < 15 \text{ N} \rightarrow 10 < \delta < 60$  à Nançay
- ⊕ 250 MHz band , 1250-1450 MHz
- ⊕ Résolution Interférométrique  $\sim 1 \text{ deg}$  @ 1400 MHz
- ⊕ Objectifs: RFI cleaning , mesures Tsys et niveau de corrélation entre antennes, test des méthodes de calibration et de reconstruction de cartes 3D en mode transit
- ⊕ Atteindre un niveau de bruit  $\sim 10 \text{ mK}$  (/par 1deg x 1 MHz pixels) - Vérification de la stabilité instrumentale sur le long terme

# PAON Test Interferometer

(J.M.Martin, J.E. Campagne)



**PAON-4**  
**(F. Rigaud)**  
4 D=5m dishes

**PAON-2 →**  
installed September 2012

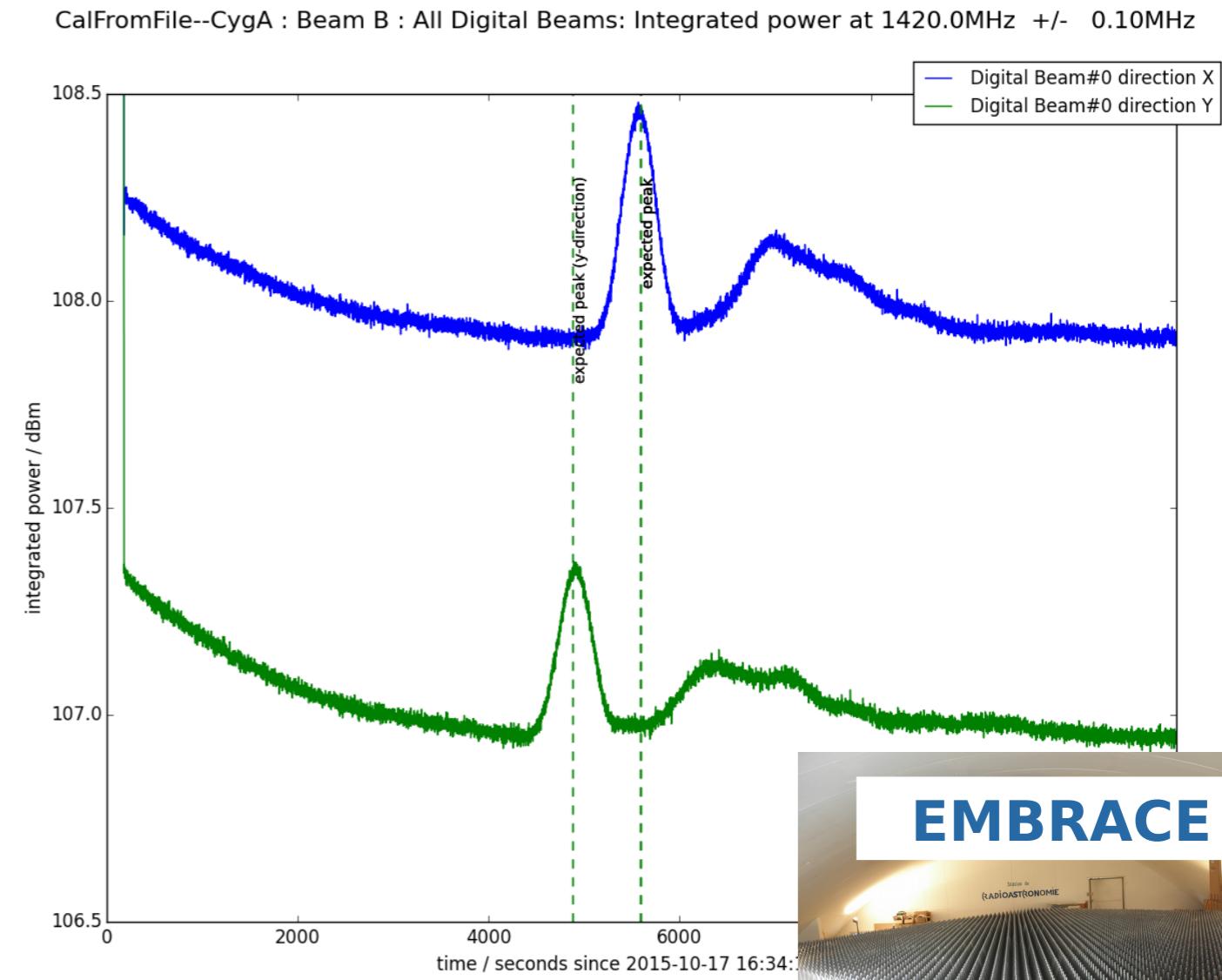
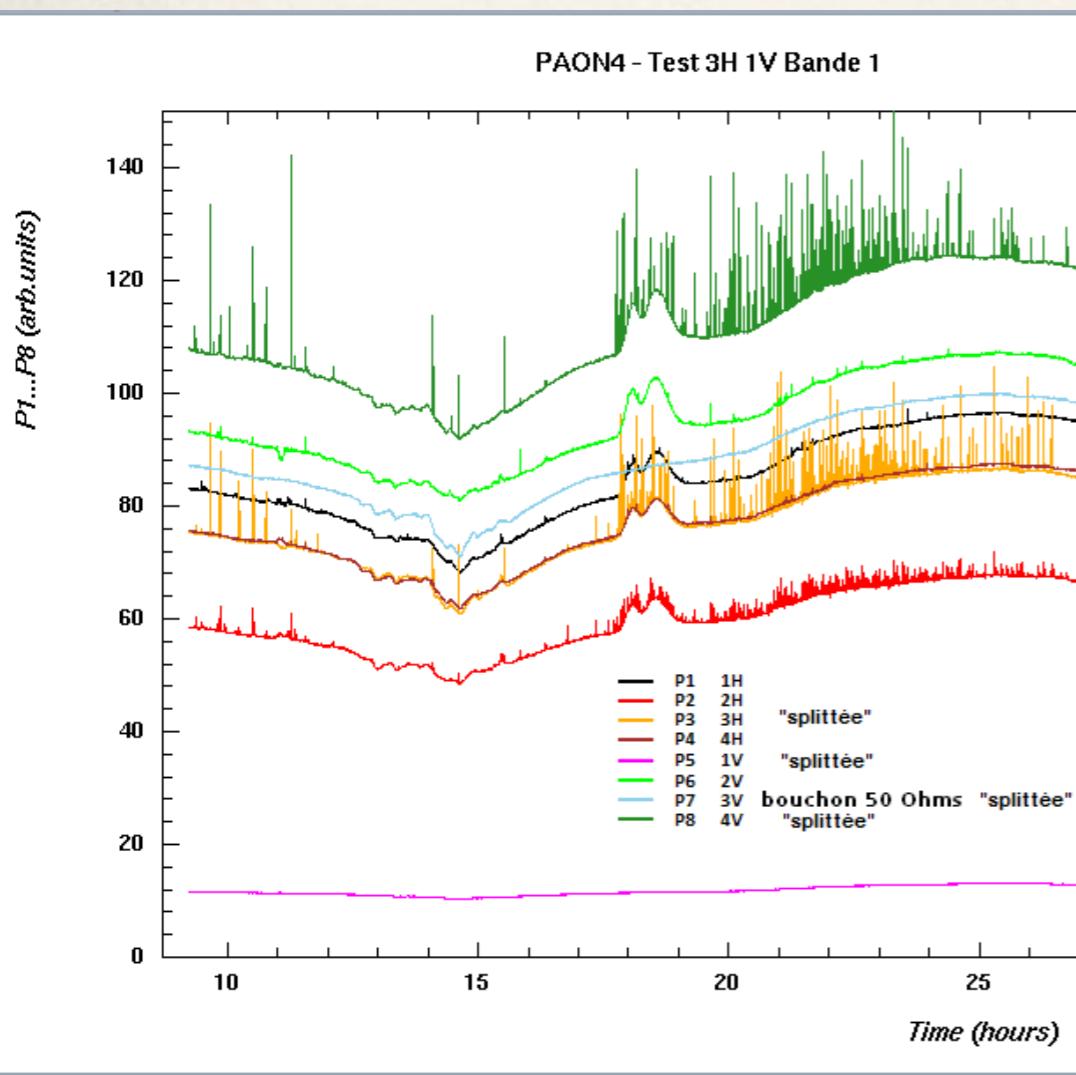




## Inauguration PAON-4 à Nançay - 2 Avril 2015

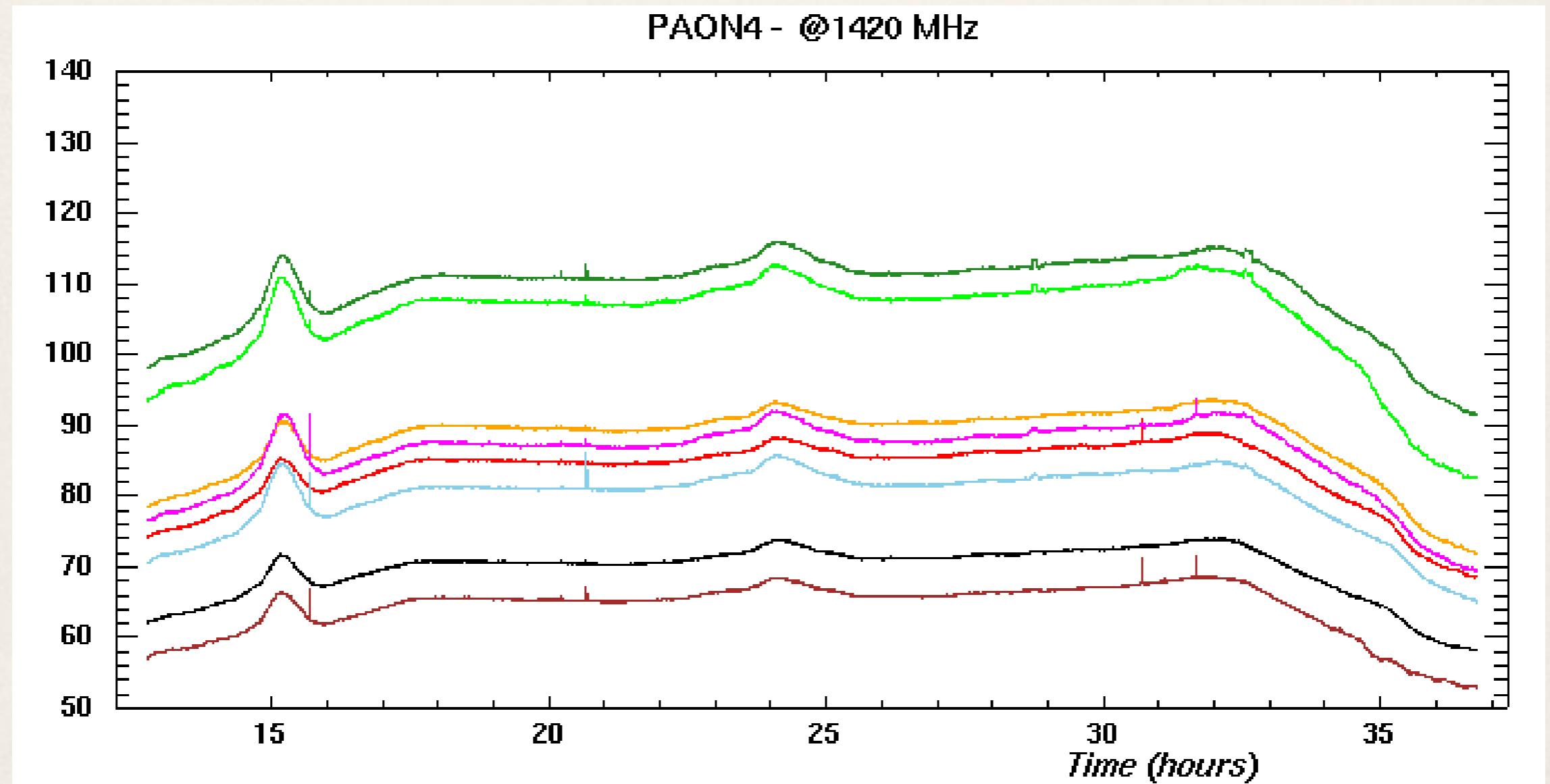
en présence des directeurs de laboratoires (LAL, USN-Nançay)  
et du président de l'Observatoire de Paris

# Debugging by comparison to EMBRACE

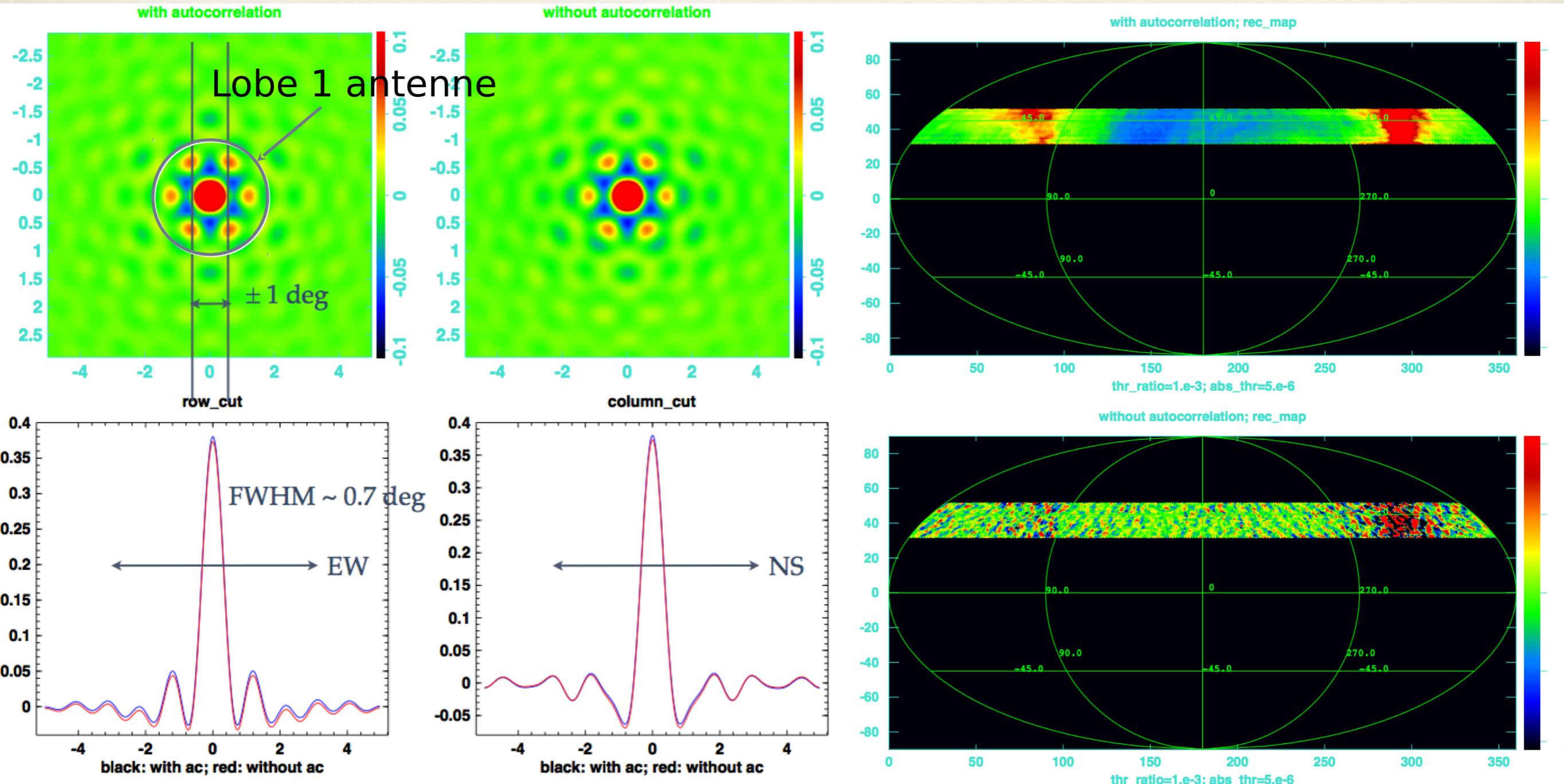


Isolating RFI to internal components

# Improved Isolation of components



# PAON-4 : lobes, cartes reconstruites (simulations)

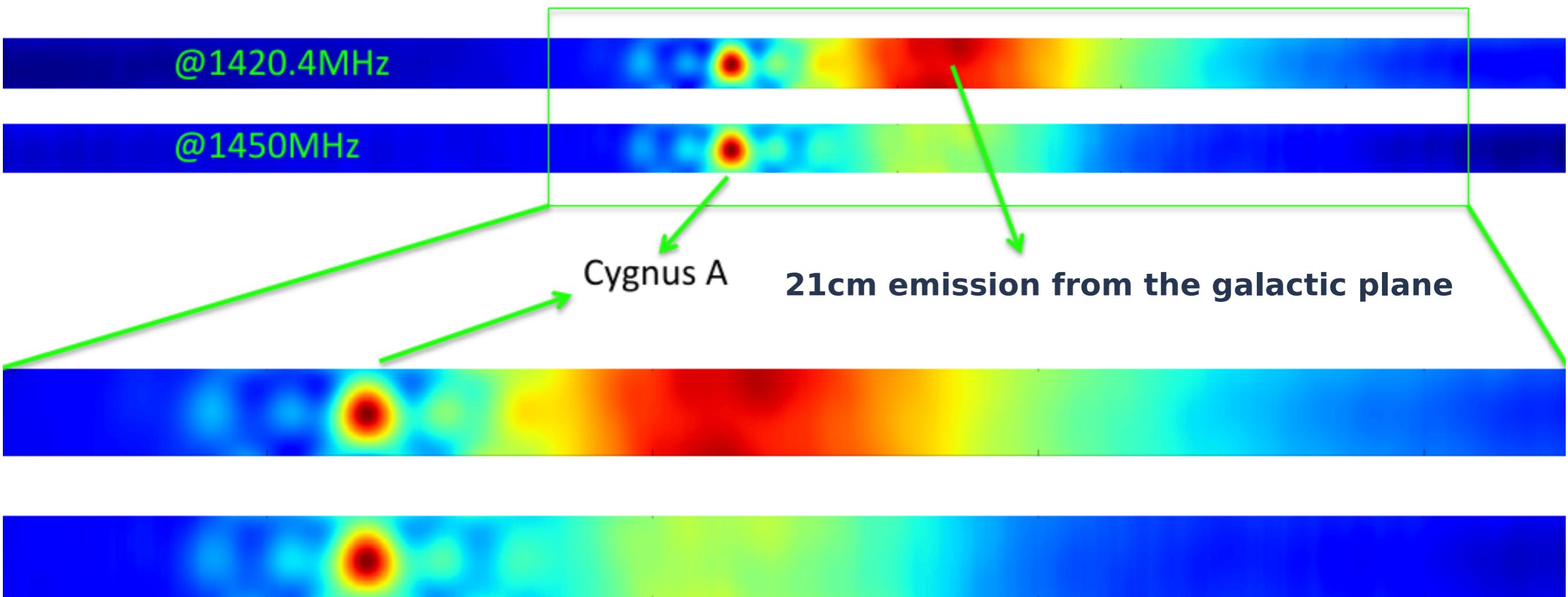


PAON-4 beam

Jiao Zhang, reconstruction de cartes pour interféromètre en mode transit (thèse en cotutelle avec le NAOC)

# First PAON-4 Map

- Map by Qizhi Huang (PhD LAL - NOAC)
- 24 hour scan

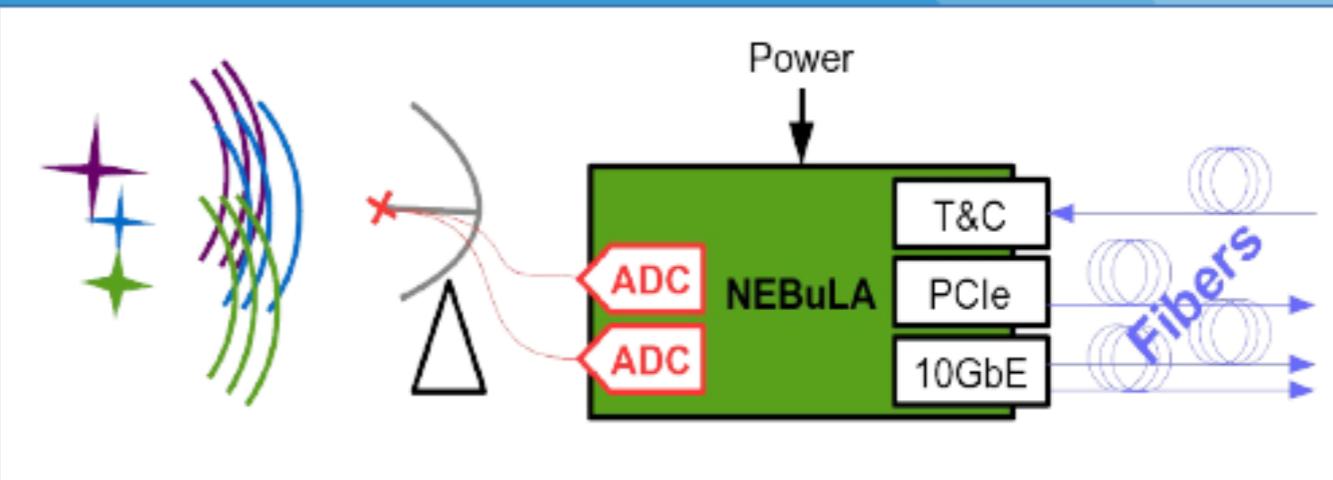




(NumEriseur à Bande Large pour l'Astronomie)

**Cédric Viou (INSU/Nançay) et Daniel Charlet (IN2P3/LAL)  
soutenu par le CS de l'Observatoire de Paris, et le CSAA de l'INSU**

- Réalisation d'une carte de numérisation « mutualisée »
  - 1 USN (0.25 ETP) : Firmware, traitement du signal, qualification ADC
  - 4 LAL (2.7 ETP) : CAO, Ctrl-cmd
- Spécifications adéquates pour :
  - NRT
  - PAON-4, puis PAON-xxx
- Sur les principaux points techniques :
  - ADC (8 bits, 2x1 Gech/s)
  - Interfaces optiques (PCIe, 10GbE)
  - Format (compact, robuste)
- Syntonisation et synchronisation
  - Implémentation du protocole WhiteRabbit (bientôt un standard IEEE1588...)



- Bandwidth: 250MHz → 500MHz
- échantillonnage directe : suppression de mélangeurs

# Tianlai

- Projet mené par le NAOC (PI: X. Chen) en partenariat avec Canada, États-Unis, Corée du Sud, France
- Collaboration constituée en 2011-2012 - Financement obtenu en 2012 (?) pour une première phase
- En chine: participation de l'*Institute of Automation* (électronique numérique) et *Institute 54* (Antennes, électronique Analogique) + ...
- Recherche de sites à travers le territoire chinois - Choix du site en 2013
- Début d'aménagement du site à l'été 2014: construction d'une route (piste) et ligne électrique 10 kV, fibres optiques (7 km) depuis le village le plus proche - Construction du lieu de vie et salles électronique/informatique
- Réseau de 3 cylindres (15mx40) et un réseau de 16 réflecteurs (D=6 m) déployé à l'été 2015
- Phase Tianlai pathfinder: 96 (dual-pol) récepteurs sur les 3 cylindres - Corrélateur 192 voies (FPGA+DSP) en cours d'installation + corrélateur 32 voies pour le réseau des 16 antennes



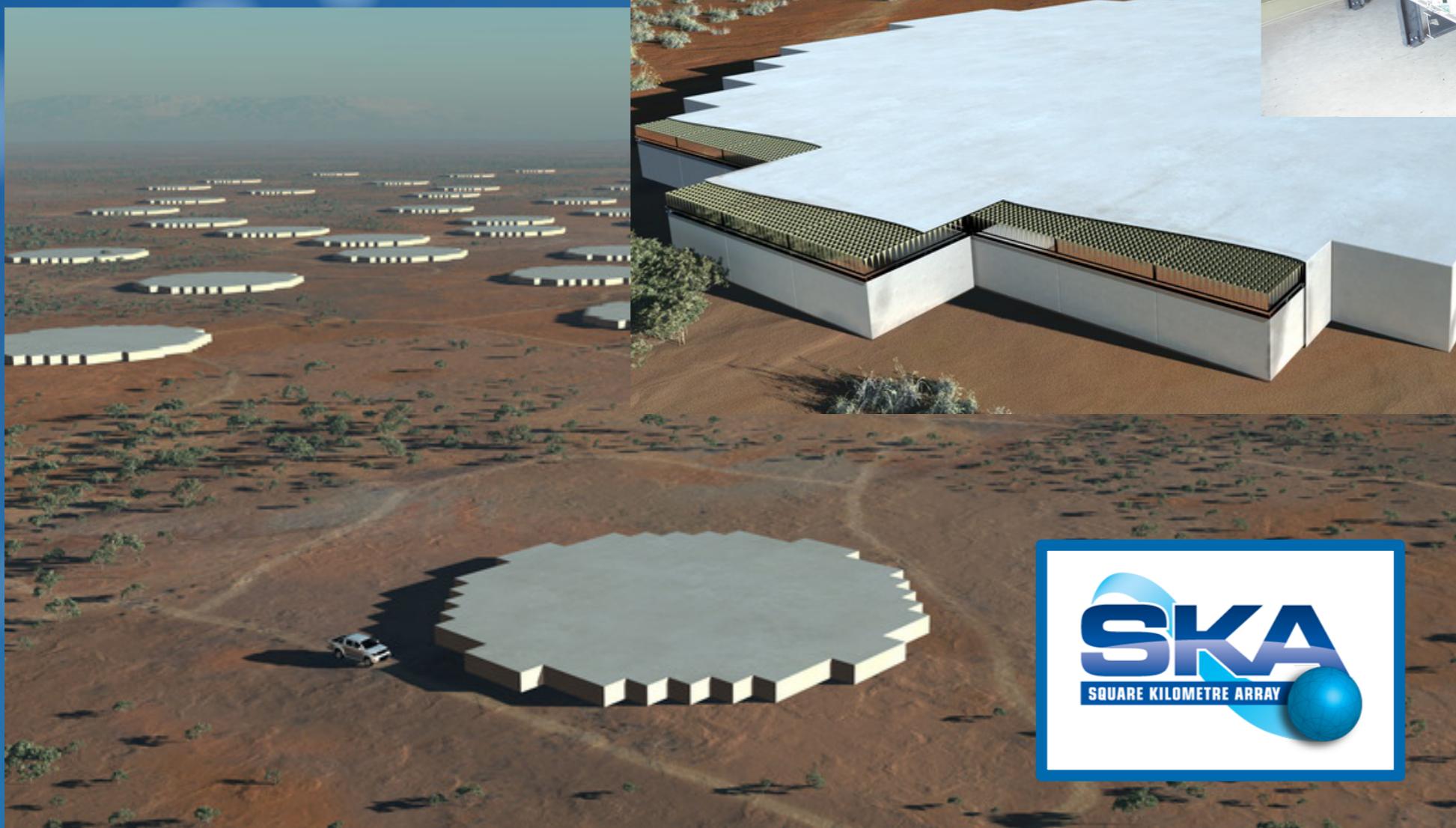
Tianlai site : 44.15 N , 91.8 E  
Hongliuxia Xinjiang, western China



Sep. 2015



# Square Kilometre Array



# Exploring the Universe with the world's largest radio telescope



Phase I : 2020



After rebaselining (2015)



Slide by R. Braun  
SKA Science director

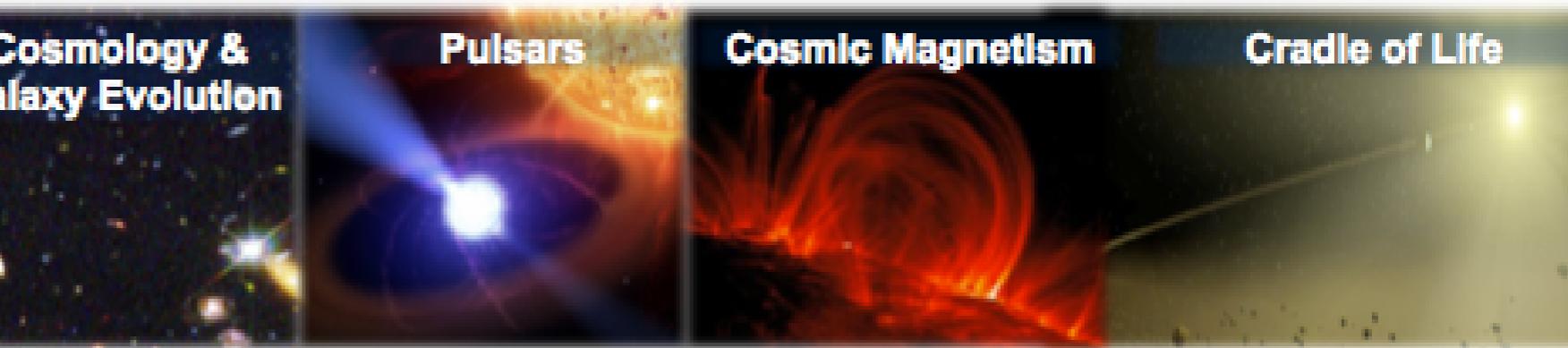
Phase II : 2024



Science



Cosmology &  
Galaxy Evolution



Cosmic Magnetism

Cradle of Life

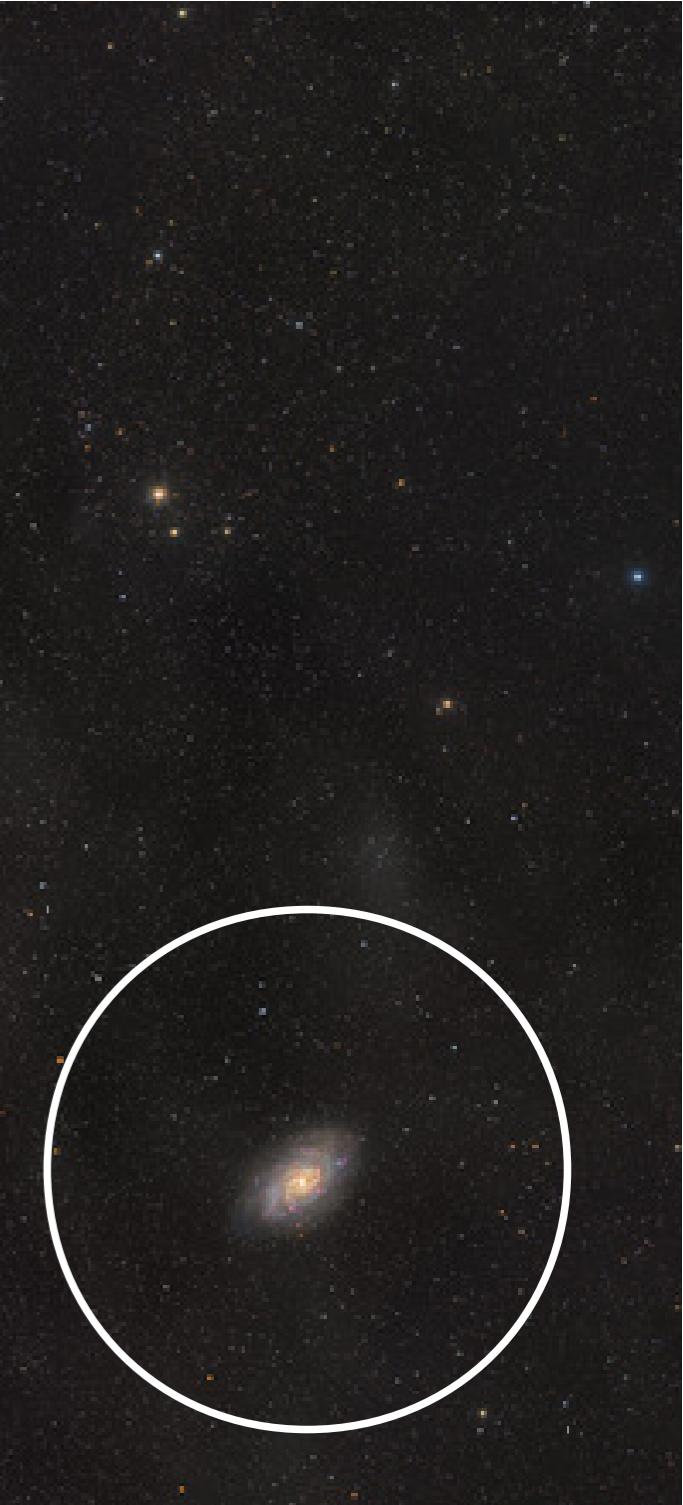
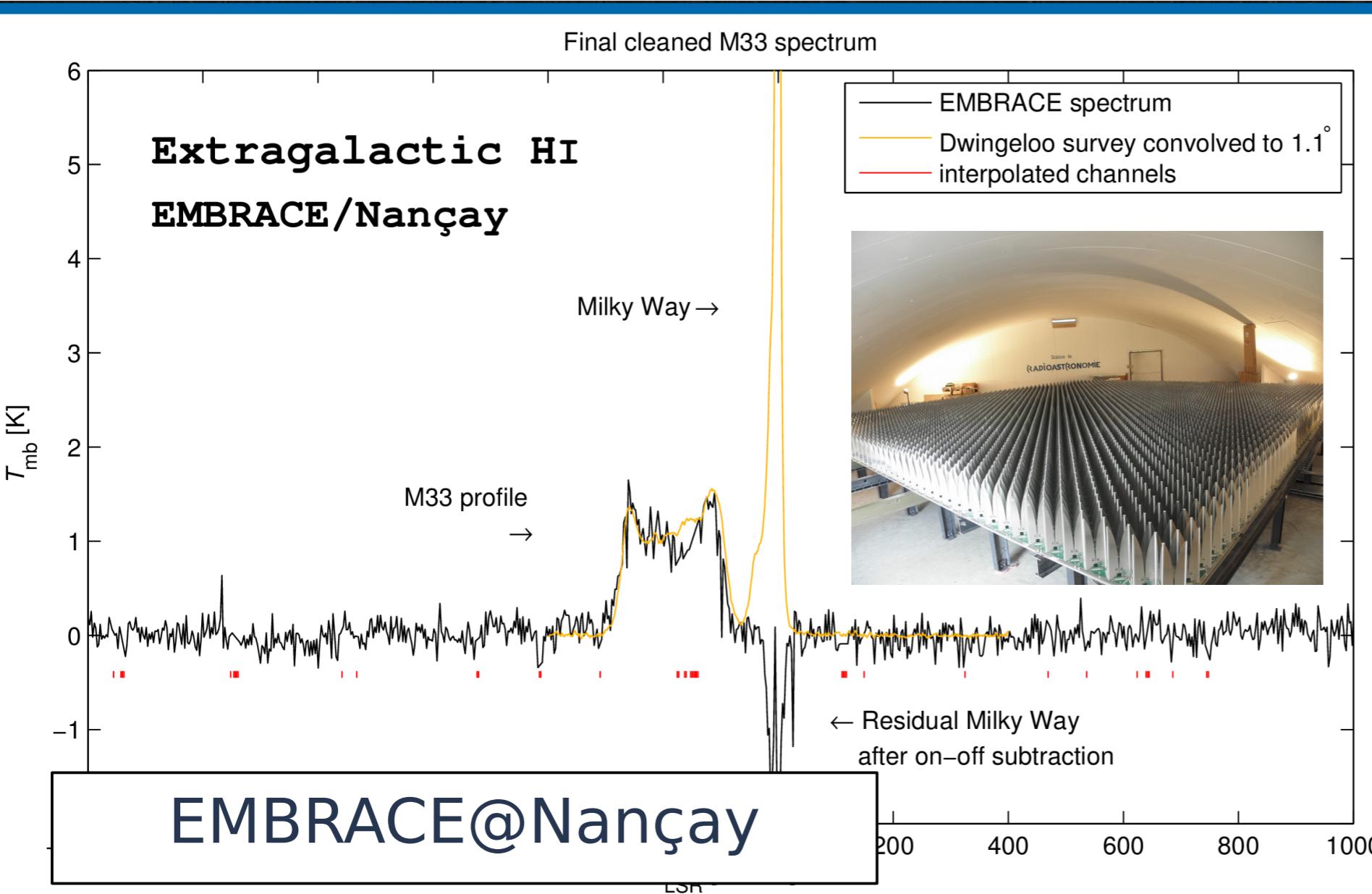
50 MHz

100 MHz

1 GHz

10 GHz

# EMBRACE demonstrates viability of Dense Aperture Array



<http://arxiv.org/abs/1504.03854>  
 published in Journal of Instrumentation:  
 doi:10.1088/1748-0221/10/07/C07002  
 A&A 2015 submitted

# Summary

- Perspectives scientifiques prometteuses (DE, distribution de masses HI et son évolution à  $z \sim 1-2$ , caractérisation fine des avant-plans, pulsars ...) pour les relevés 21 cm à  $z \sim 1-2$
- PAON-4 & EMBRACE : banc test pour l'analyse des données et développements électronique (NEBuLA) ...
- Tianlai, HIRAX (CHIME) permettront peut-être de développer la cartographie 3D 21 cm et ouvriront la voie à des instruments plus ambitieux: SKA-mid/AA (Aperture Arrays)
- Défis scientifiques et techniques : traitement numérique en ligne lourd (corrélateur/beam-former) calibration, réduction des données, Reconstruction des cartes 3D, soustraction des avant-plans ...