

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

IRFU - CEA

Observatoire de Paris

R. Ansari
J.E. Campagne
M. Moniez
A.S. Torrento
D. Breton
C. Beigbeder
T. Cacaceres

D. Charlet
Q. Huang
B. Mansoux
C. Pailier
M. Taurigna
J. Zhang

C. Magneville
C. Yèche
J. Rich
J.M. Legoff

P. Abbon
E. Delagnes
H. Deschamps
C. Flouzat
P. Kestener

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

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

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

z=1: 5σ detection in 1 hour → 1 km² collecting area

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

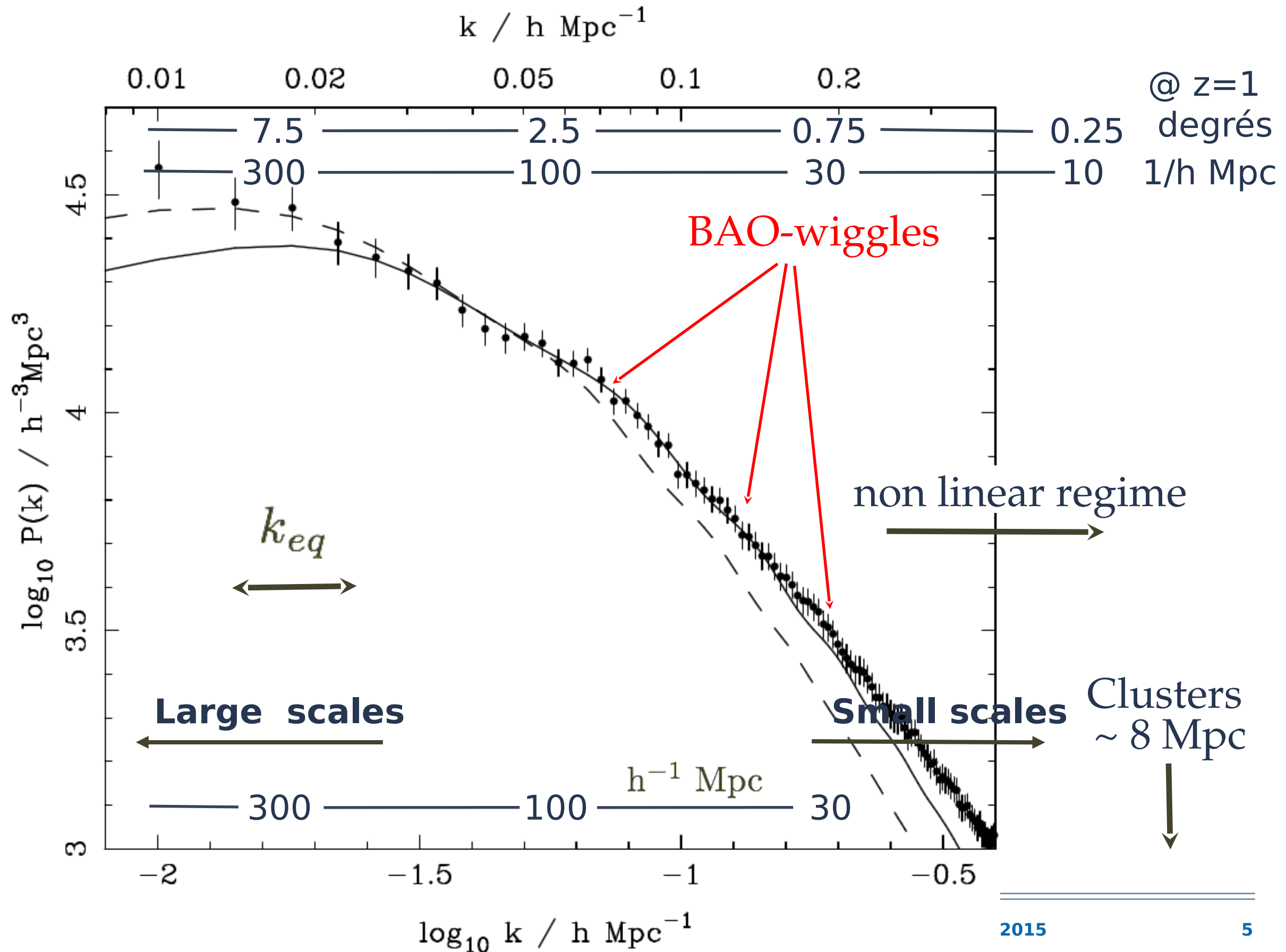
S_{21} en μJy pour $M_{HI} = 10^{10} M_{\odot}$

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

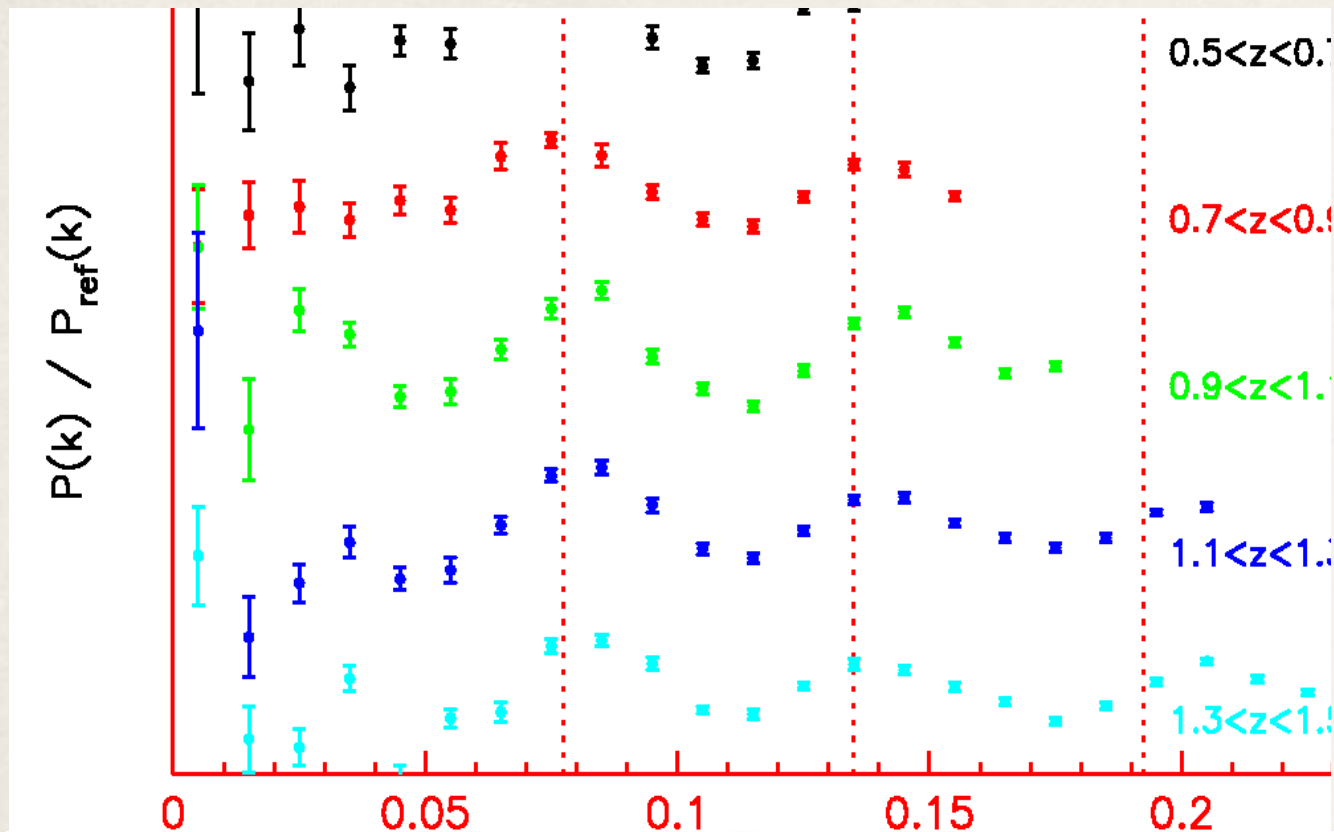
z	S21 (μJy)
0,25	175
0,50	40
1,0	9,6
1,5	3,5
2,0	2,5

> 100 000 m² → SKA !

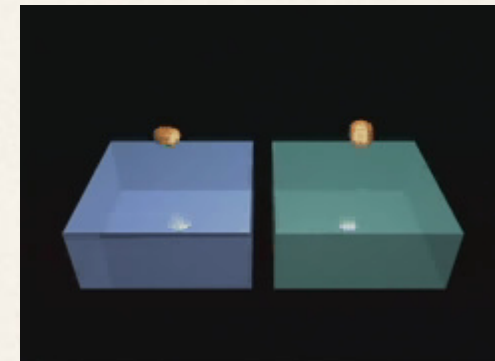
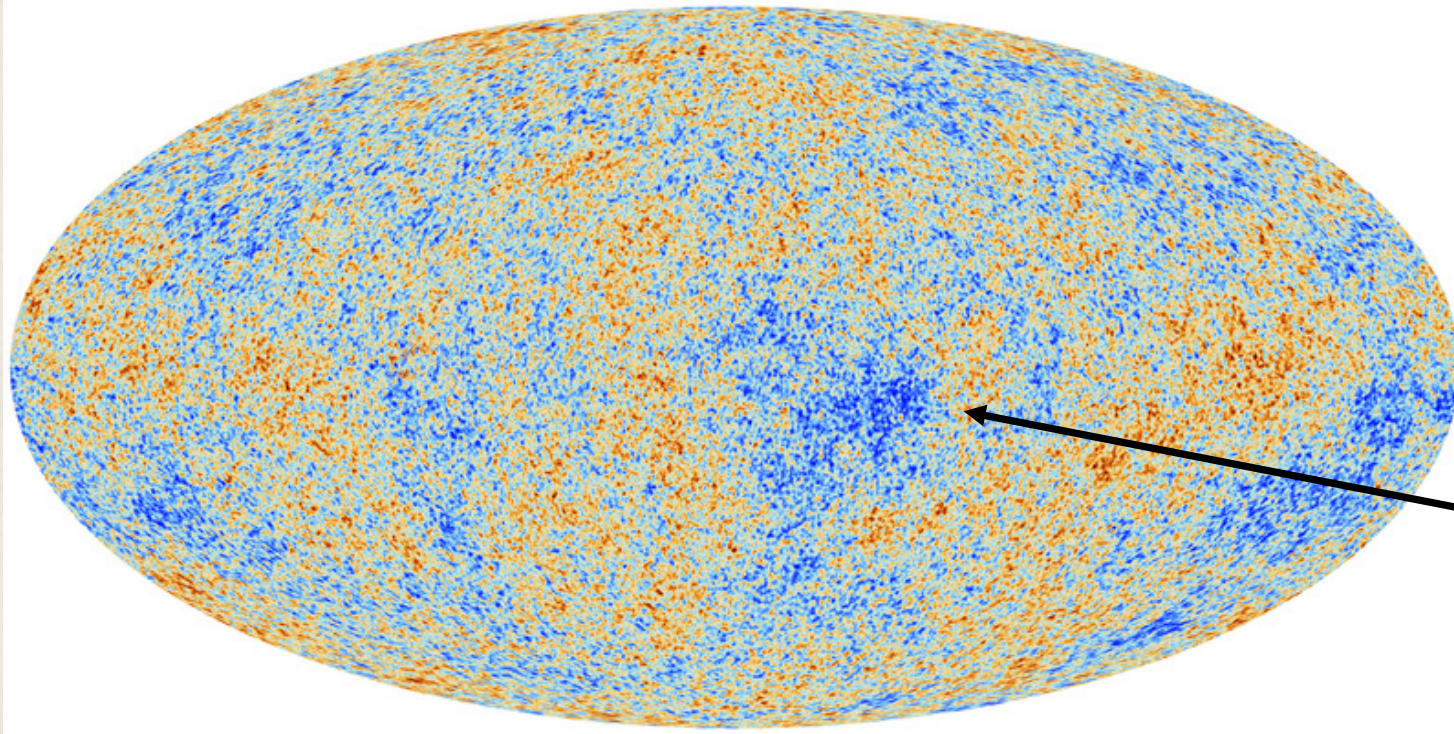
BAO scales $\gtrsim 0.2$ degree



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 - $\nu = f(z)$, $z: 0 \dots 10$
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: $D=100 \text{ m} \rightarrow \sim 20'$, $D=1\text{km} \rightarrow \sim 2'$, $D=100 \text{ km} \rightarrow \sim 1''$, $2' \rightarrow 1 \text{ Mpc @ } z = 1$
- † Mesure d'intensité en optique, amplitude & phase in radio;
Imagerie/CCD en optique, interférométrie et spectroscopie en radio
- † Bruit instrumental (ro-noise <5 e) souvent négligeable en optique,
dominant en radio ($T_{\text{sys}} \sim 20\text{-}50 \text{ K}$)
- † 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(α, δ, 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)

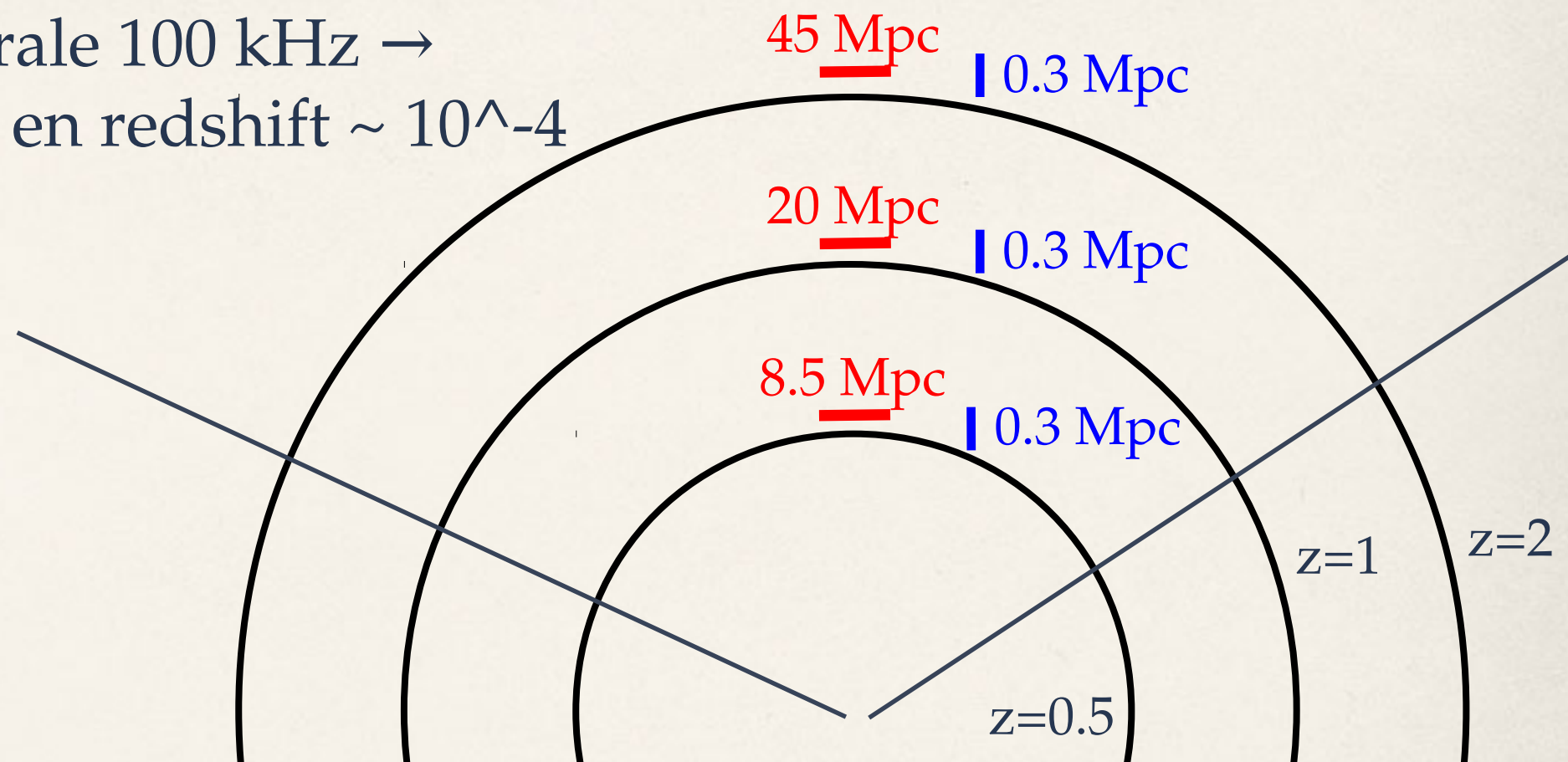
≡ Bruit instrumental / environnemental (T_{sys})

≡ 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 resol. angulaire
 $\delta\theta \sim \lambda/L$, se détériore avec le redshift z

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

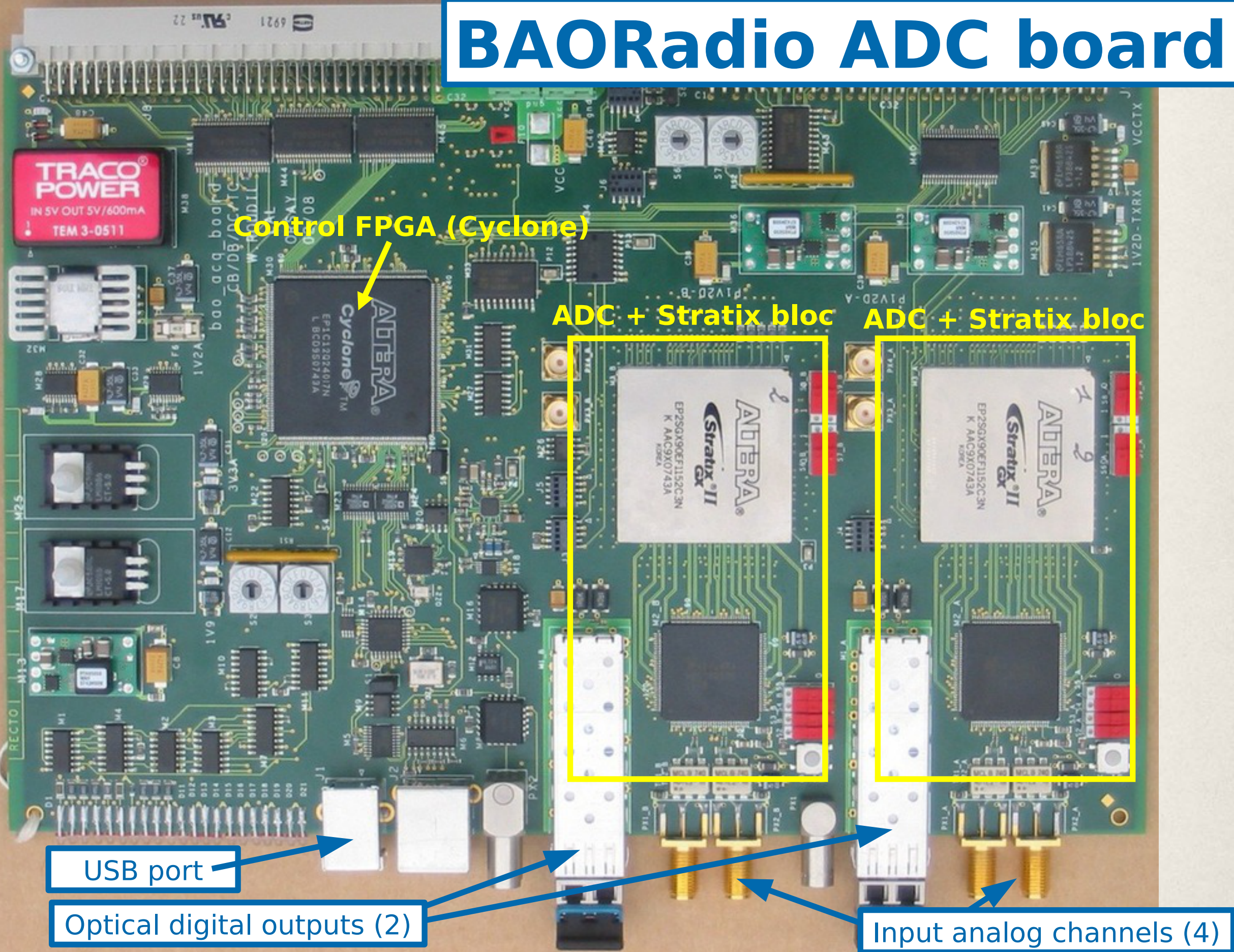


z	$\delta\theta$	d_{LOS} (Mpc)	H	δd_{\parallel} (Mpc)	δd_{\perp} (Mpc)
0,5	15'	1945	90	8,5	~ 0.3
1	20'	3400	120	20	~ 0.3
2	30'	5320	200	45	~ 0.3
3	40'	6320	300	75	~ 0.3

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 NAOCC
- 2012-2014: PAON, Tianlai
- 2015-2016: NEBuLA, PAON4, Tianlai
- Soutien financier: IRFU, CNRS / P&U, P2I, Obs. de Paris, LAL, PNCG

BAORadio ADC board

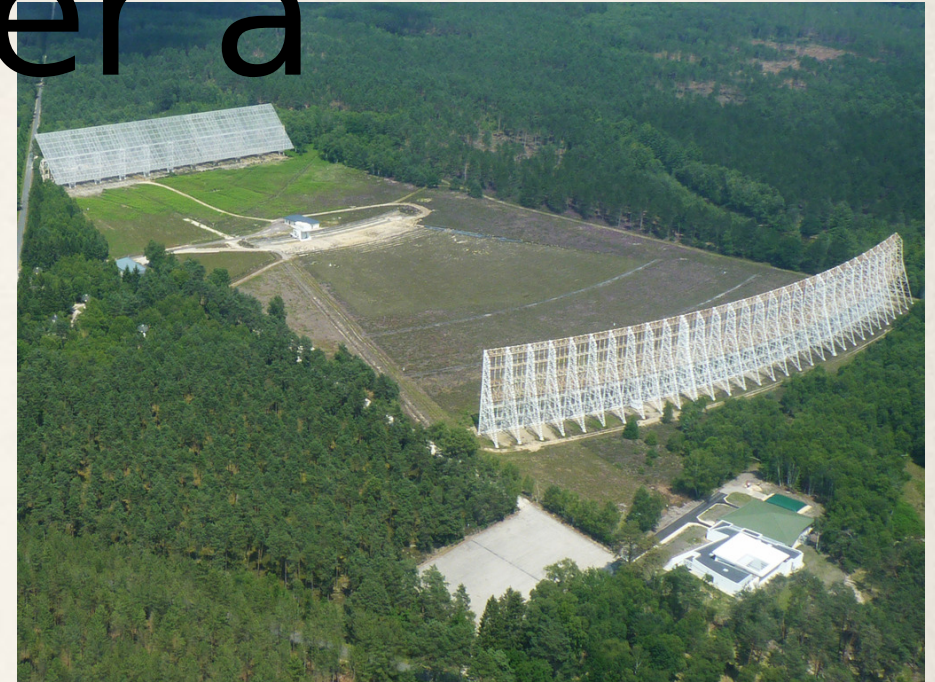


CRT (CMU, Pittsburgh)



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-corrélateur standard ACRT

Total ~ 10 -20 heures/cible - observations réparties sur \sim une
année

Calibration, nettoyage RFI, analyse des spectres

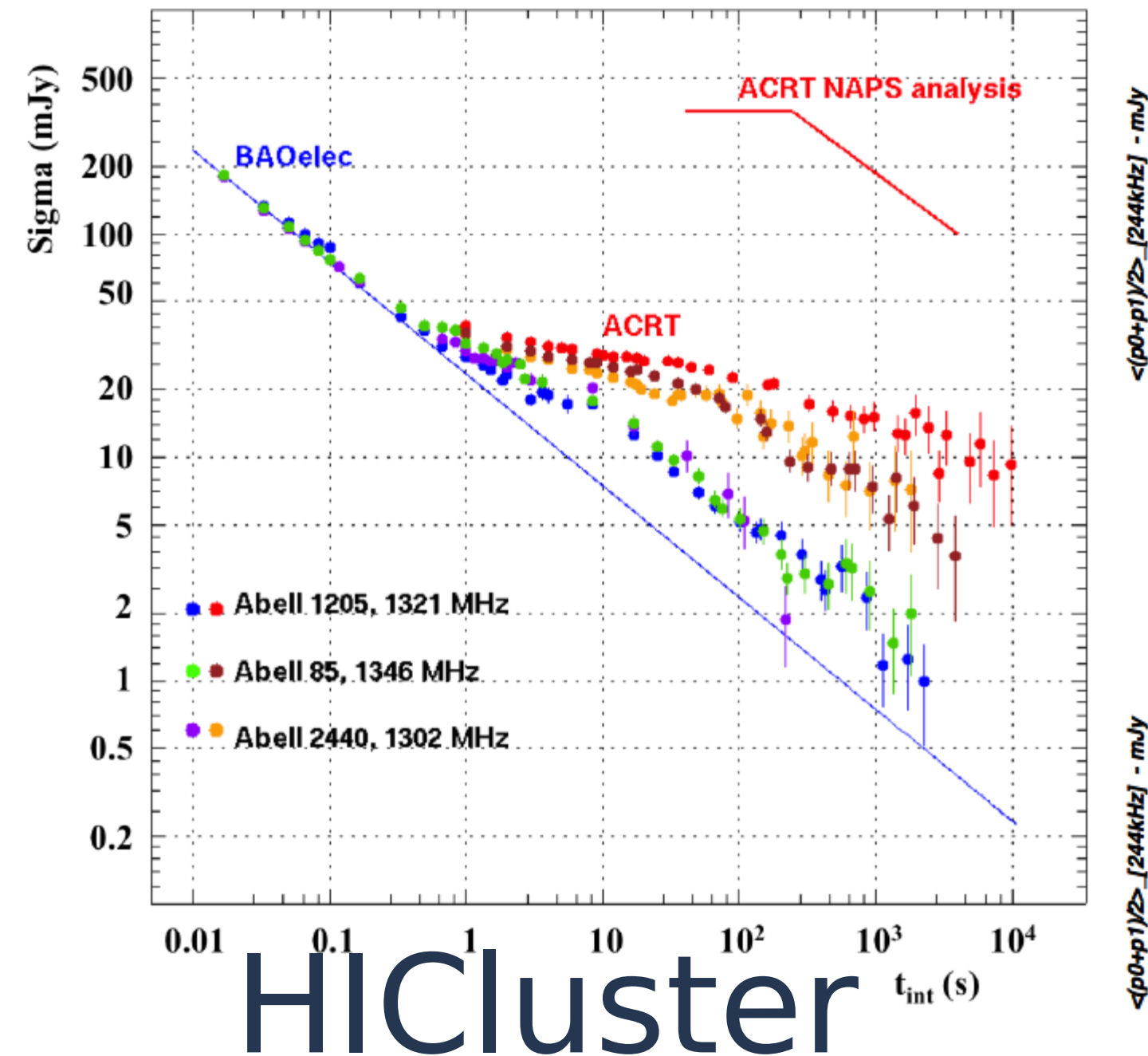
~ 150 TO de données traitées au CC-IN2P3 (transfert par iRods)

Niveau de sensibilité de \sim mK sur une large bande

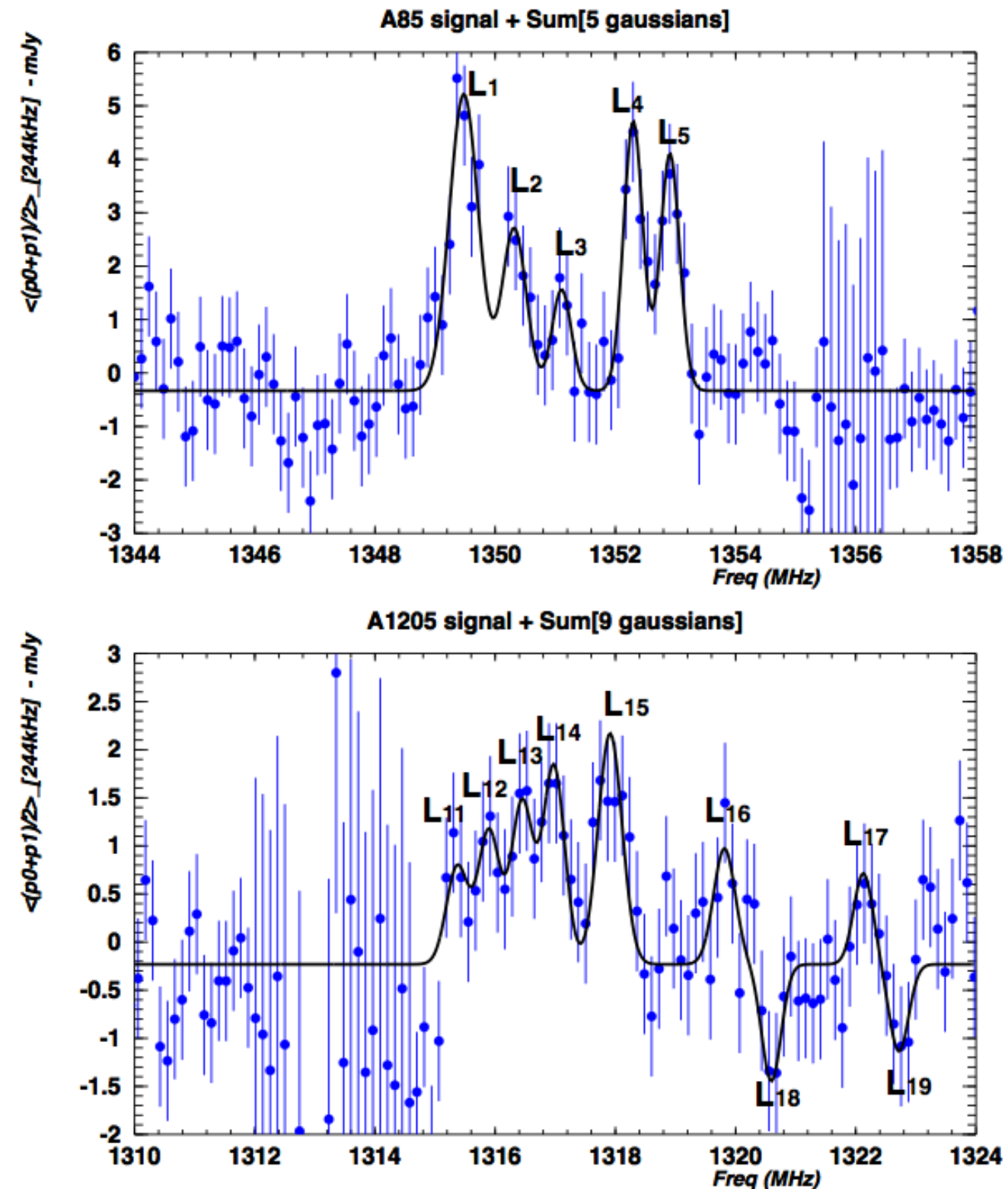
Détection/mesure du signal HI sur A85 et A1205

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 $D=5\text{m}$, réseau dense, observation mode transit
- † Surface totale $\sim 75 \text{ m}^2$, $8 = 4 \times 2$ (pol) récepteurs , 36 visibilities
 $\sim 2 \text{ GBytes/s}$ de flot de données maximum
- † $38^\circ \text{ S} < \text{Elevation} < 15^\circ \text{ N} \rightarrow 10^\circ < \delta < 60^\circ$ à Nançay
- † 250 MHz band , 1250-1450 MHz
- † Résolution Interférométrique $\sim 1^\circ$ @ 1400 MHz
- † Objectifs: RFI cleaning , mesures T_{sys} 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 $1^\circ \times 1 \text{ MHz}$ 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

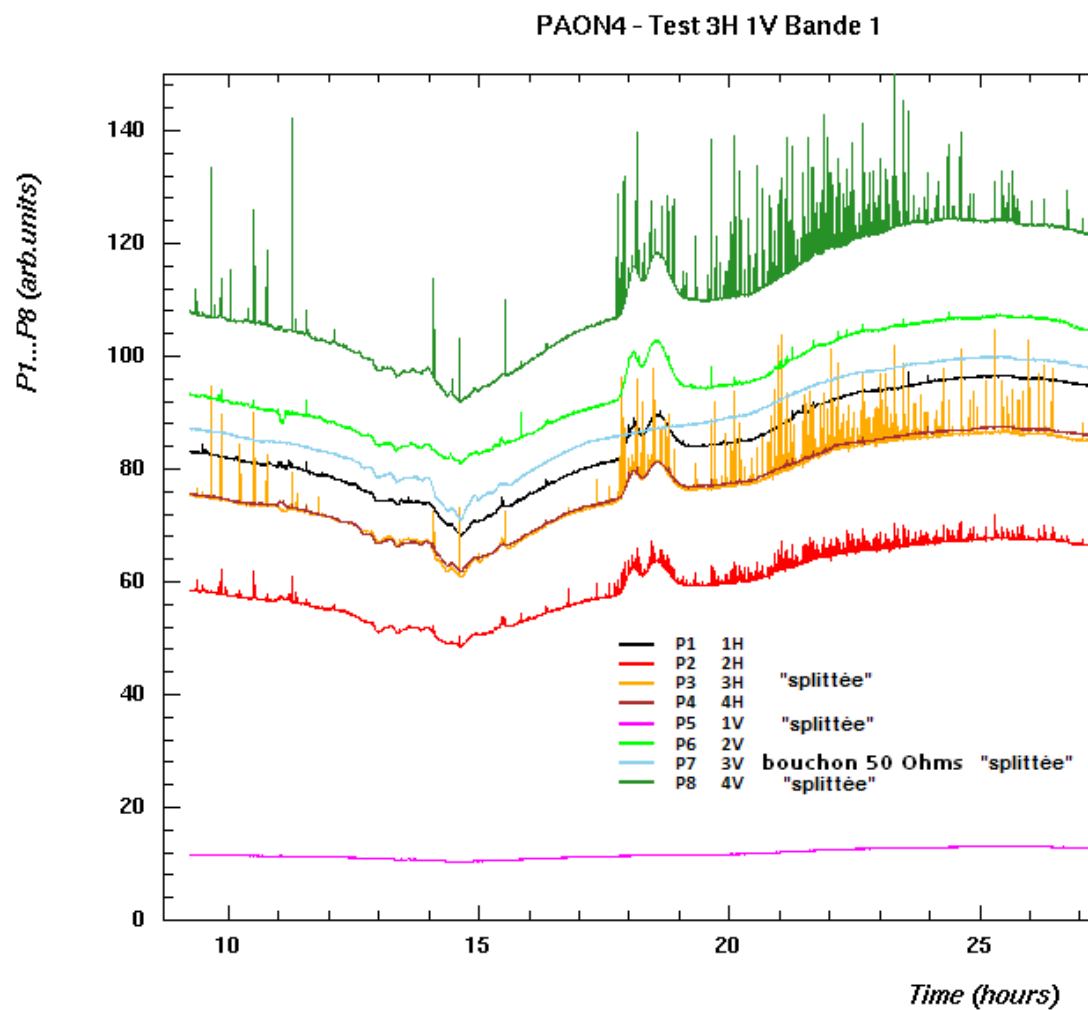
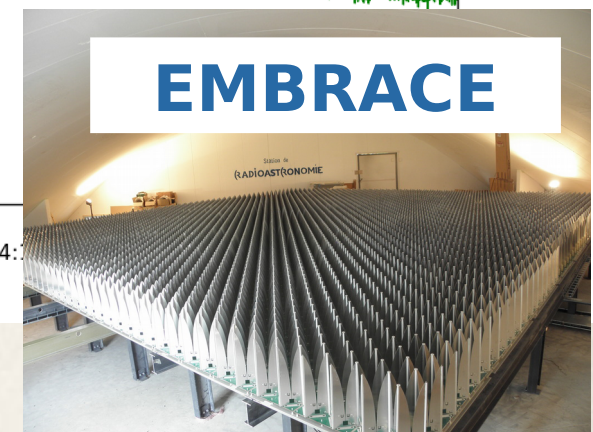
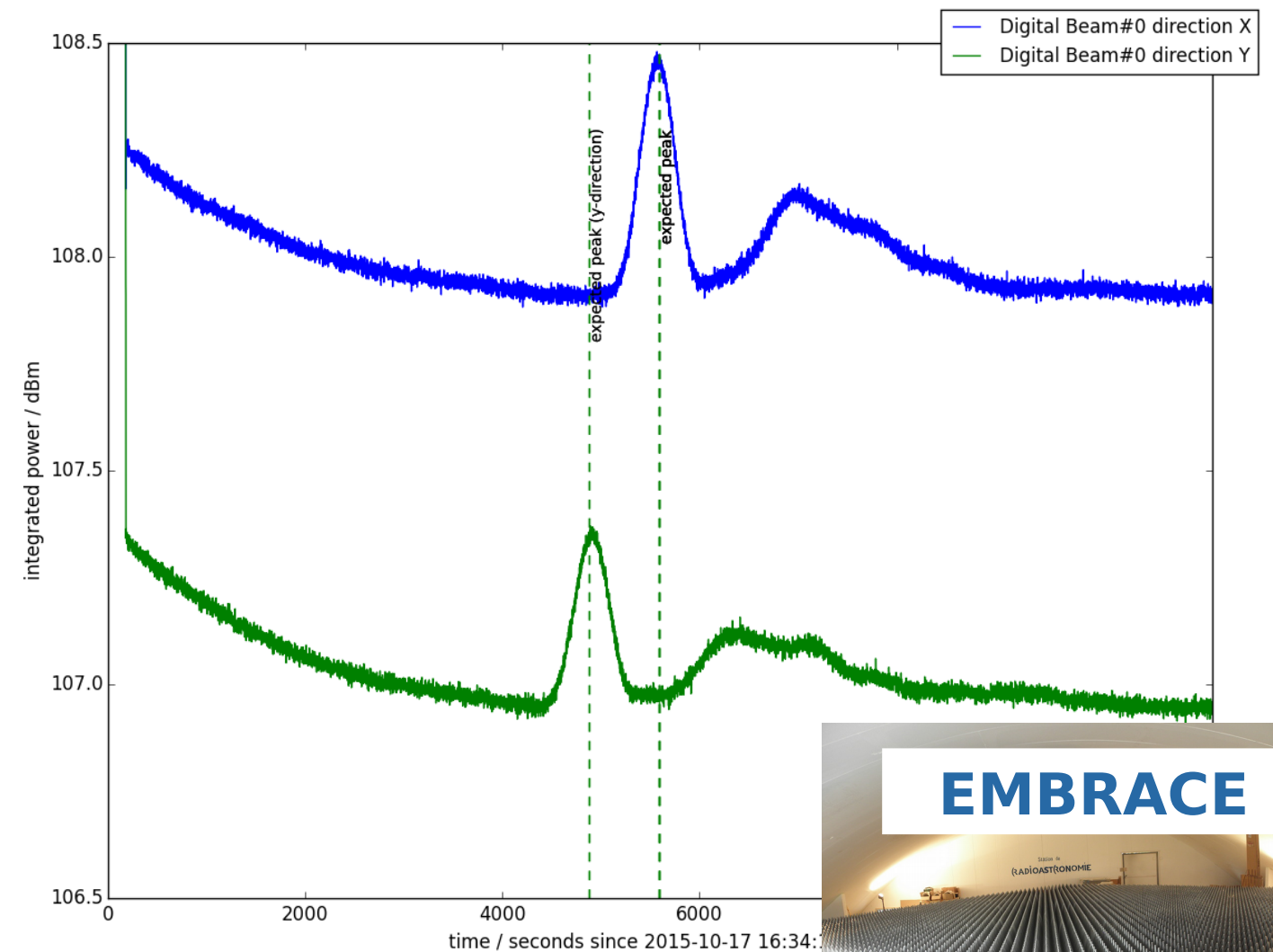




Inauguration PAON-4 à Nançay - 2 Avril 2015
en présence des directeurs de laboratoires (LAL,USN-Nançay)
et du président de l'Observatoire de Paris

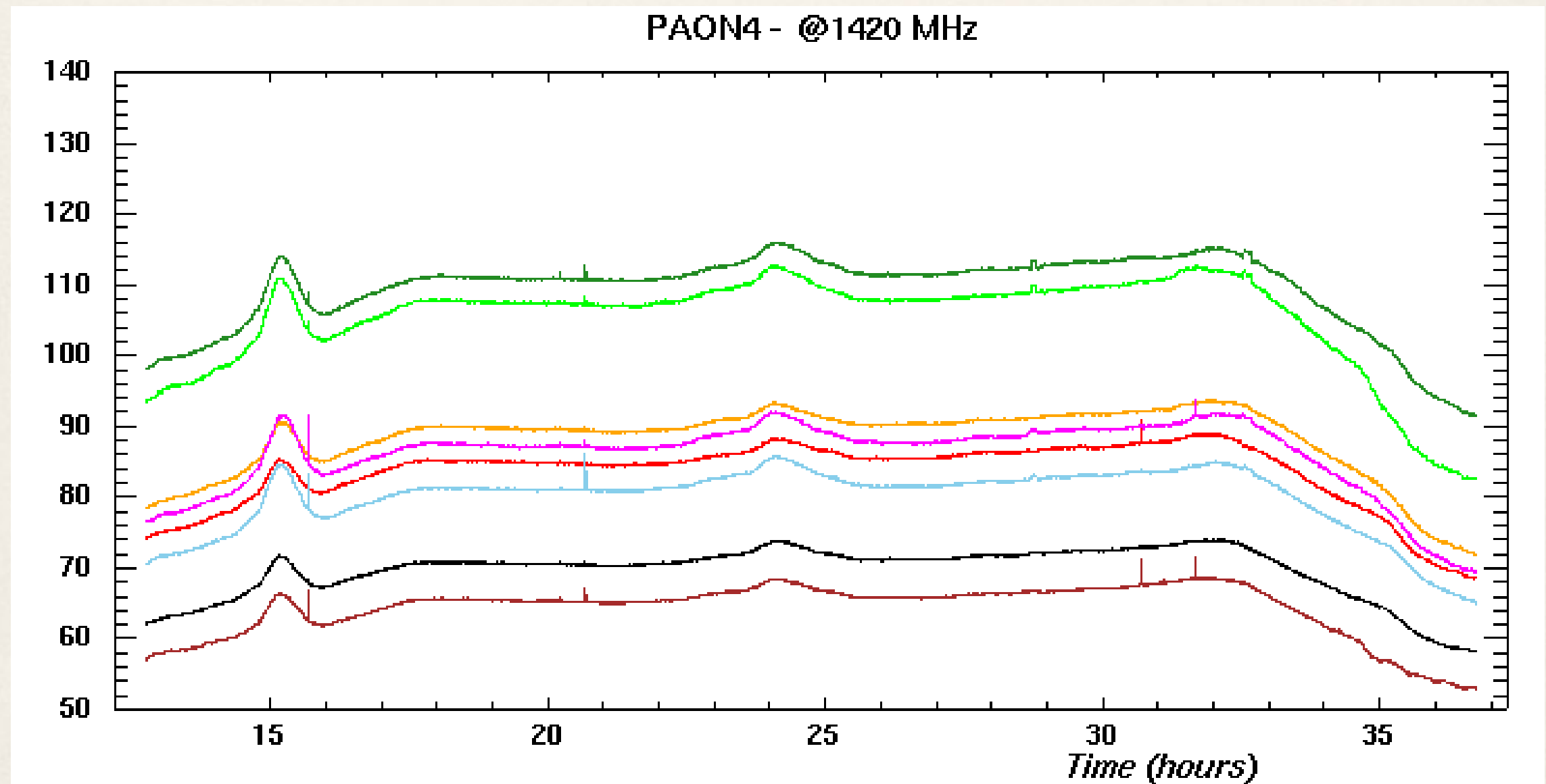
Debugging by comparison to EMBRACE

CalFromFile--CygA : Beam B : All Digital Beams: Integrated power at 1420.0MHz +/- 0.10MHz

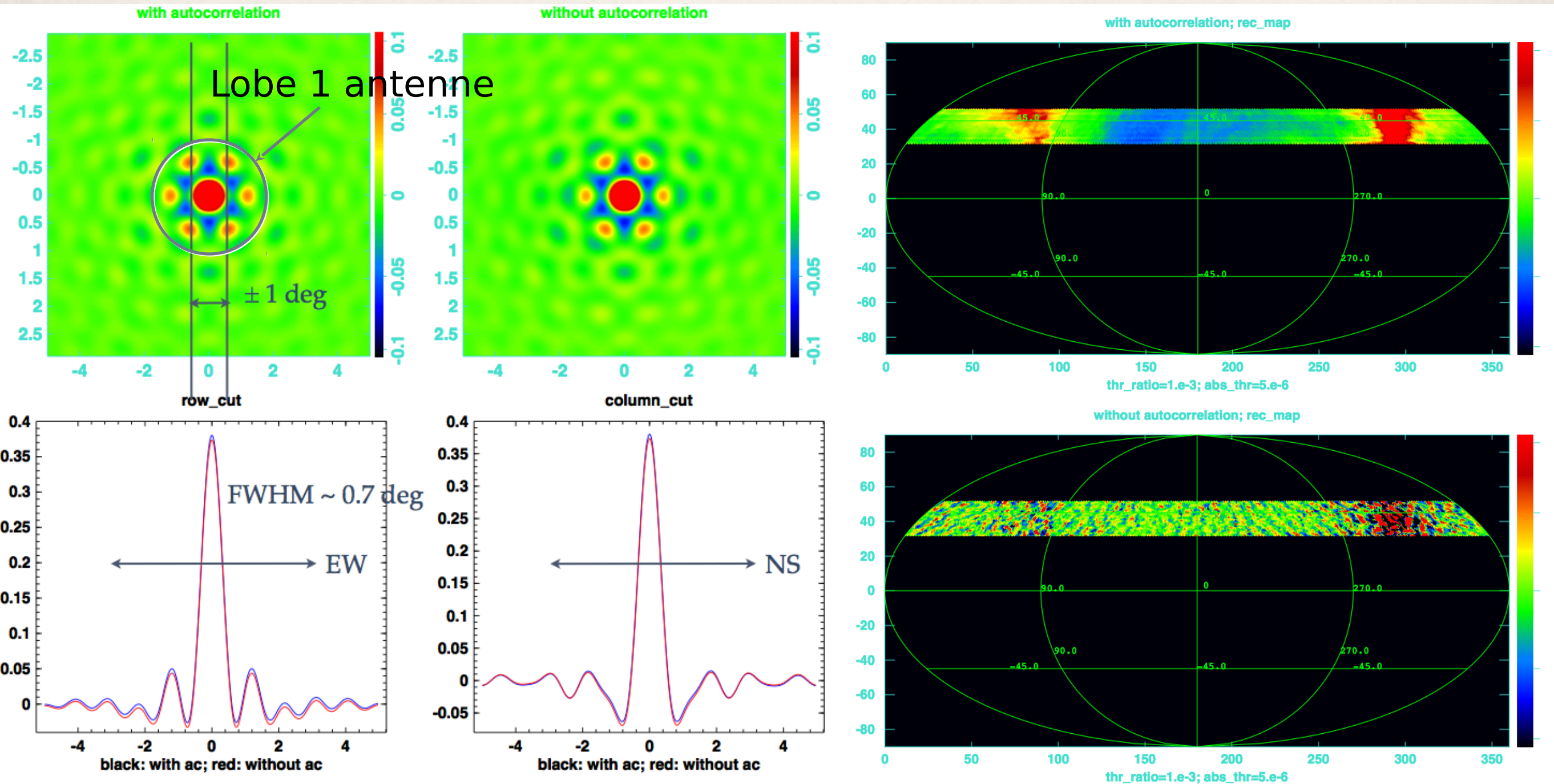


Isolating RFI to internal components

Improved Isolation of components



PAON-4 : lobes, cartes reconstruites (simulations)

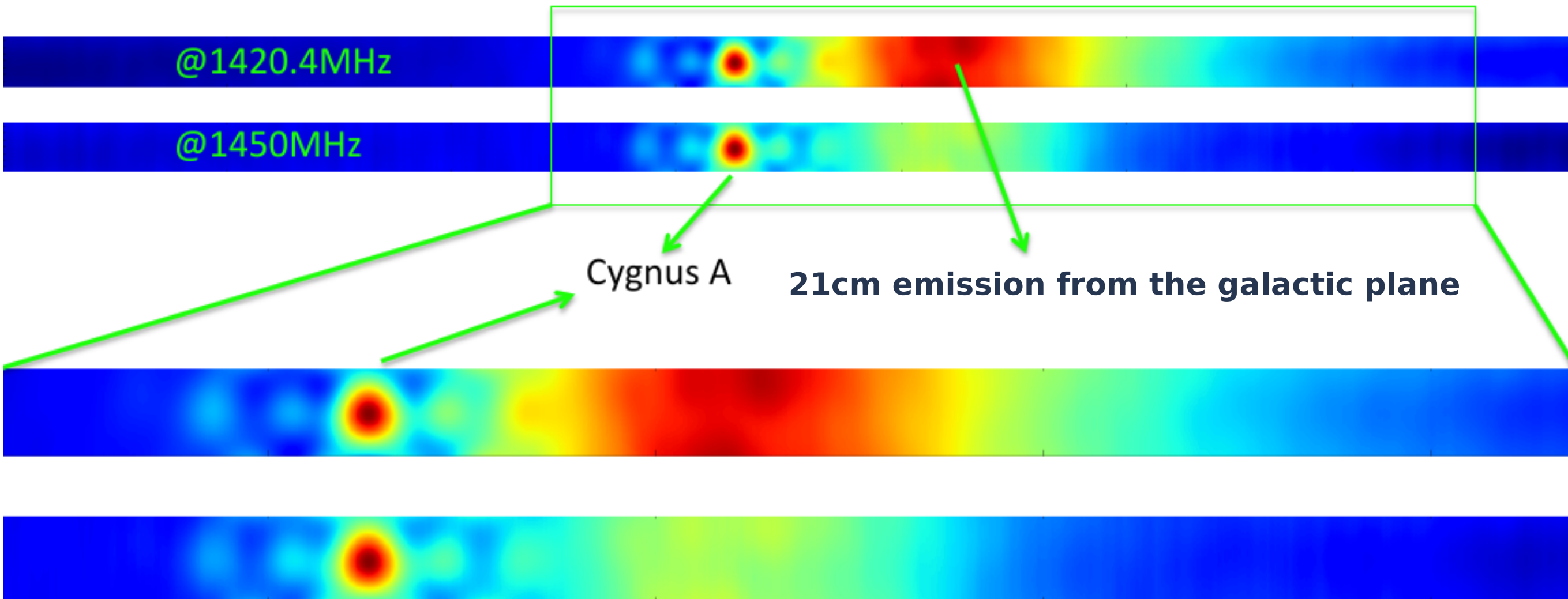


PAON-4 beam

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 :

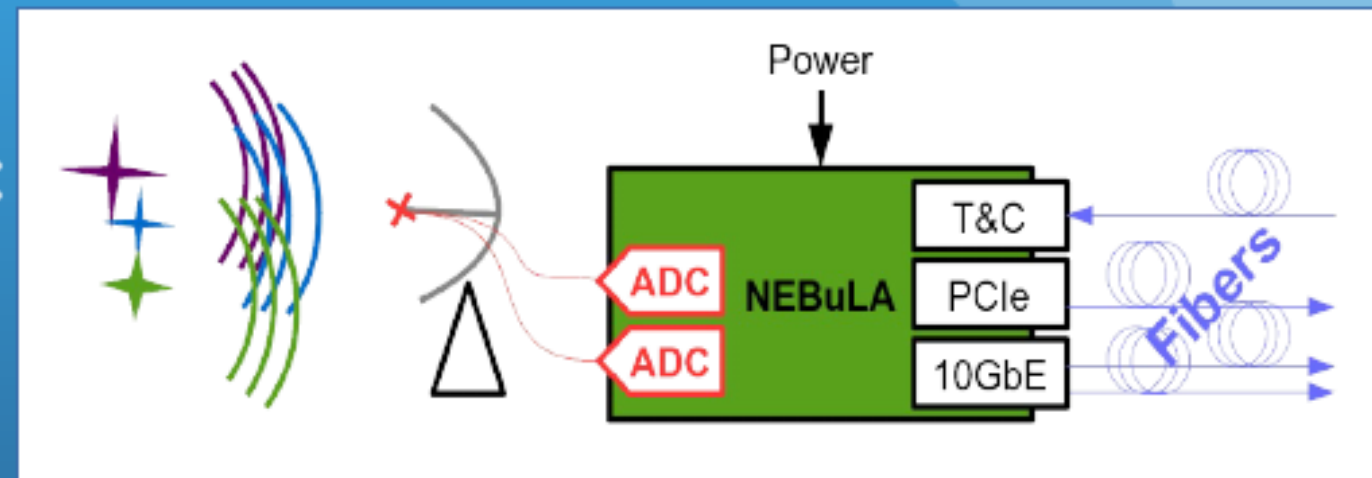
- NRT
- PAON-4, puis PAON-xxx

- Sur les principaux points techniques :

- ADC (8 bits, 2x1 Gech/s)
- Interfaces optiques (PCle, 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 NAOOC (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

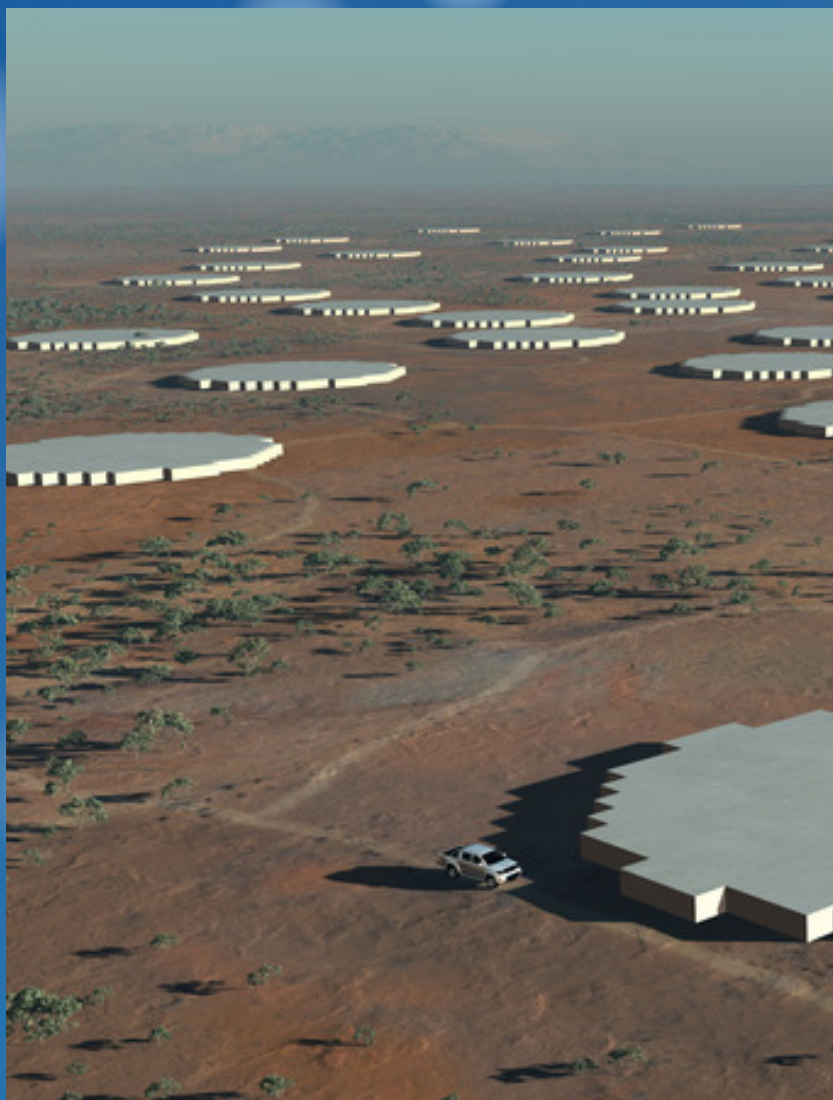
Tianlai site : 44.15 N , 91.8 E
Hongliuxia Xinjiang, western China



Sep. 2015



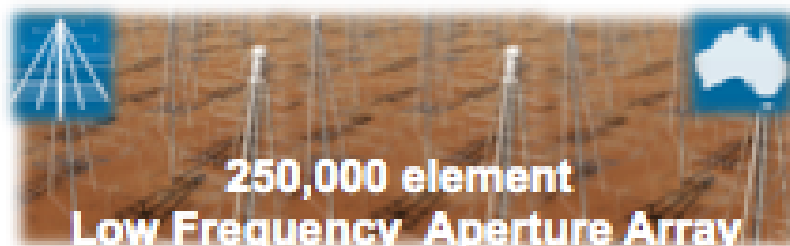
Square Kilometre Array



Exploring the Universe with the world's largest radio telescope



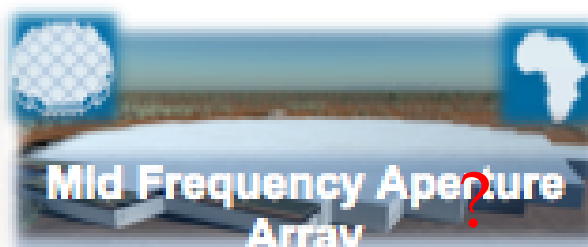
Phase I : 2020



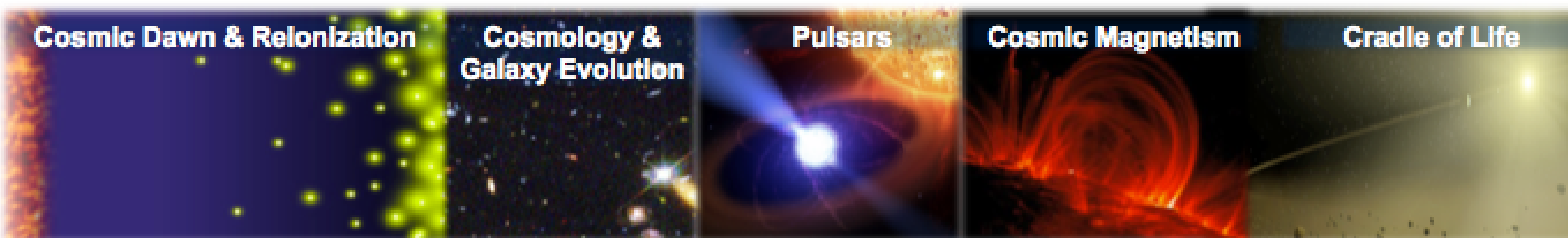
—
After rebaselining (2015)

Slide by R. Braun
SKA Science director

Phase II : 2024



Science



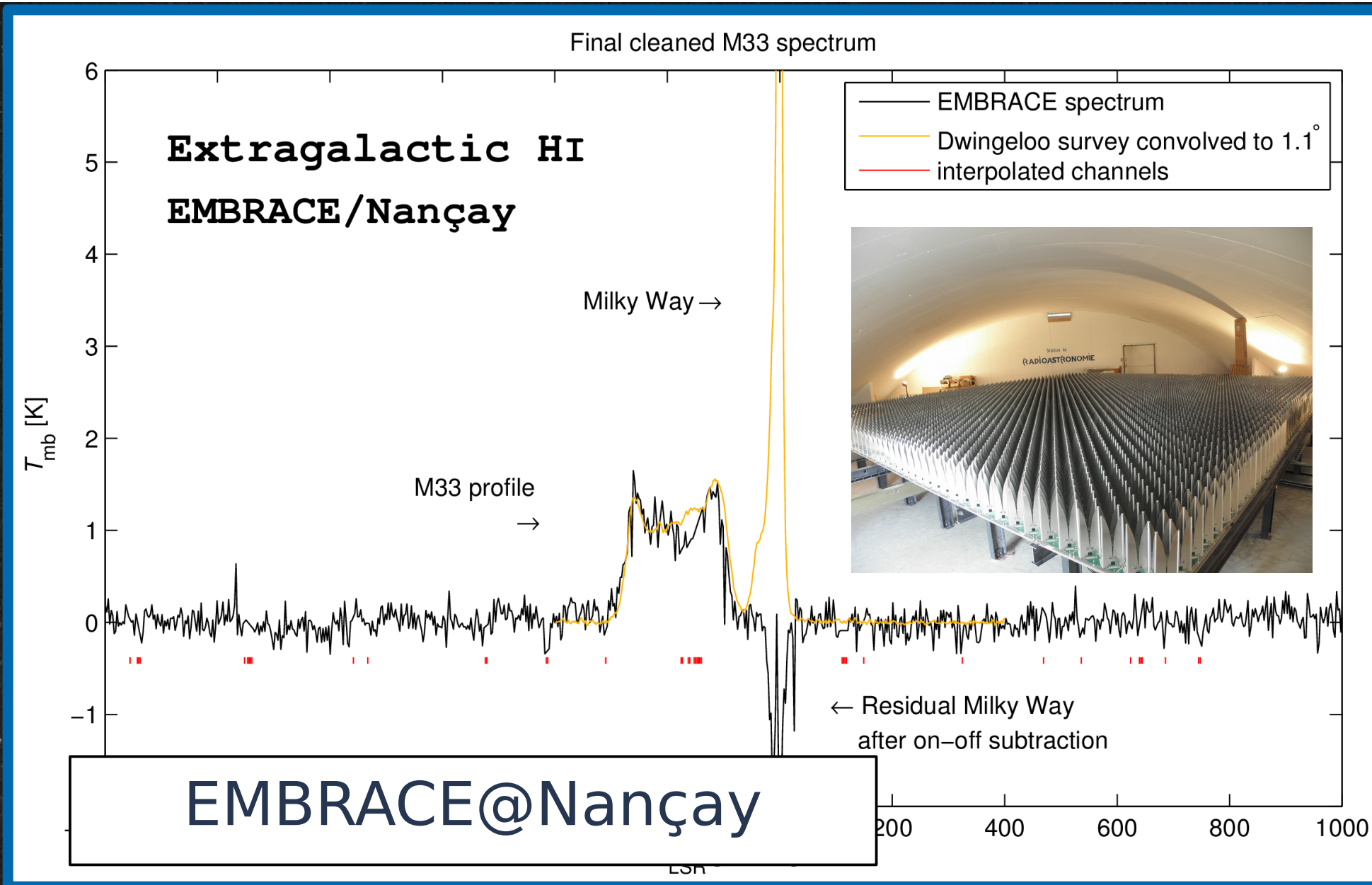
50 MHz

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 ...