

La cosmologie et les BAO's à 21 cm

Réza Ansari

(Université Paris Sud & LAL (Orsay))

BAORadio et Tianlai : la cosmologie et les BAO's à 21 cm

Rapport soumis au conseil scientifique de l'IN2P3

R. Ansari, J.E.Campagne, M. Moniez
LAL, Univ. Paris-Sud , CNRS/IN2P3

M. Bucher, K. Ganga
APC, Univ. Paris-Diderot, CNRS/IN2P3

C. Magneville, C. Yèche
Irfu-SPP , CEA

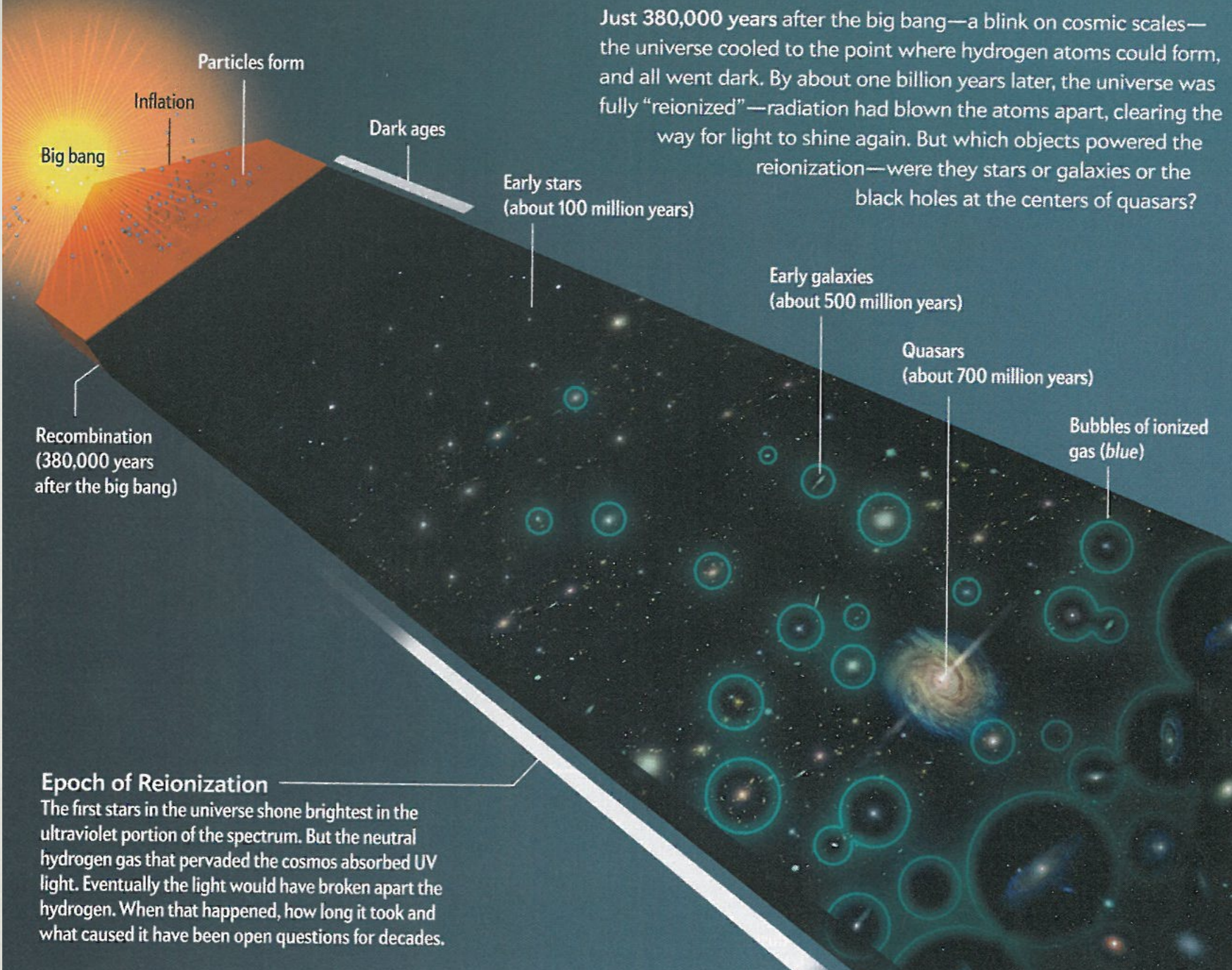
P. Colom, J.M. Martin, S. Torchinsky
Observatoire de Paris, CNRS/INSU

PAON-4: LAL(CNRS / IN2P3), Irfu(CEA), Obs. Paris Meudon (DIL, GEPI, LESIA, UFE, USN-Nancay)

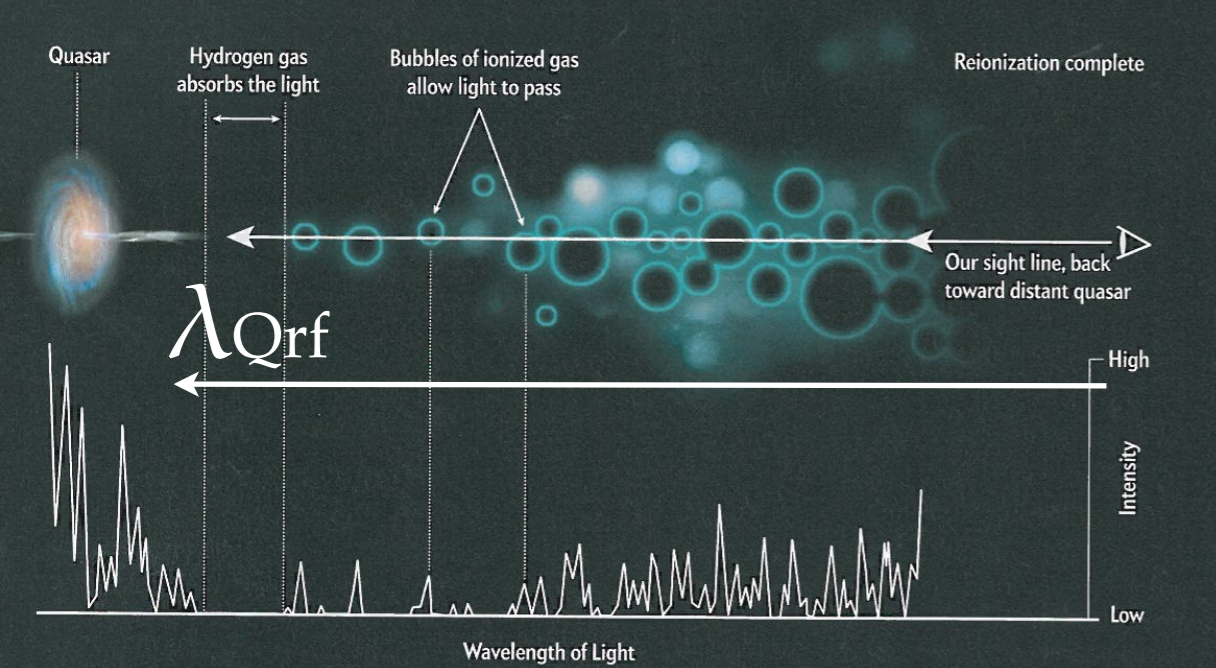
NEBuLA: LAL(CNRS / IN2P3), Irfu(CEA), USN (Obs.Paris-CNRS / INSU)

- * Brève histoire de l'hydrogène dans l'univers
- * Les grandes structures et les BAO's à 21 cm
 - * La cartographie 3D (Intensity Mapping)
 - * les avant-plans, effets instrumentaux
- * Le projet BAORadio France
 - * Les grandes étapes de 2007 à 2015
 - * Projet en cours : PAON-4, NEBuLA
- * HIRAX et Tianlai (*et CHIME*)
- * SKA (/ LOFAR, EMBRACE)

Illustration : Scientific American, April 2014



	Dark ages		Reionisation First stars / Galaxies ...		Quasars ...	Dark Energy Acc.Expansion		Today
n_b (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	



1965ApJ...142.

NOTES

ON THE DENSITY OF NEUTRAL HYDROGEN IN INTERGALACTIC SPACE

Recent spectroscopic observations by Schmidt (1965) of the quasi-stellar source 3C 9, which is reported by him to have a redshift of 2.01, and for which Lyman- α is in the visible spectrum, make possible the determination of a new very low value for the density of neutral hydrogen in intergalactic space. It is observed that the continuum of the source continues (though perhaps somewhat weakened) to the blue of Ly- α ; the line as seen on the plates has some structure but no obvious asymmetry. Consider, however, the fate of photons emitted to the blue of Ly- α . As we move away from the source along the line of sight, the source becomes redshifted to observers locally at rest in the expansion, and for one such observer, the frequency of any such photon coincides with the rest frequency of Ly- α in his frame and can be scattered by neutral hydrogen in his vicinity.

...

The flux can come from three sources; normal galaxies, radiogalaxies, and QSS's, and the intergalactic medium itself. The contribution from the first two sources can be estimated roughly, and almost certainly does not exceed 3×10^{-24} units at $z = 2$, of which about 10 per cent is from quasi-stellar sources (assuming that one can extrapolate the visual radiation into the UV with a spectral index of -0.7 , and assuming a present space density of $[600 \text{ Mpc}]^{-3}$).

...

We would like to express our sincere thanks to Dr. Maarten Schmidt, who kindly put the 3C 9 plates at our disposal for measurement. The qualitative conclusions in the present version of this paper are in agreement with the analysis of Dr. J. Bahcall and Dr. E. Salpeter (to be published). We are indebted to Dr. J. Bahcall and Dr. E. Salpeter and also Dr. D. Sciama for pointing out numerical errors in the circulated preprint. This work was supported by the National Science Foundation and the National Aeronautics and Space Administration.

JAMES E. GUNN
BRUCE A. PETERSON

May 26, 1965; revised July 26 and in proof on October 8, 1965

MOUNT WILSON AND PALOMAR OBSERVATORIES
CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON
CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

REFERENCES

- Allen, C. W. 1963, *Astrophysical Quantities* (London: Athlone Press).
 Field, G. 1962, *Ap. J.*, **135**, 684.
 Field, G., and Henry, R. 1964, *Ap. J.*, **140**, 1002.
 Karzas, W., and Latter, R. 1961, *Ap. J. Suppl.*, **6**, 167.
 Sandage, A. 1961a, *Ap. J.*, **133**, 355.
 ———. 1961b, *ibid.*, **134**, 916.
 Schmidt, M. 1965, *Ap. J.*, **141**, 1295.

Spectre du Quasar

3C9 @ $z = 2.01$

Absence d'absorption

Ly- α redshifté

⇒ faible densité de

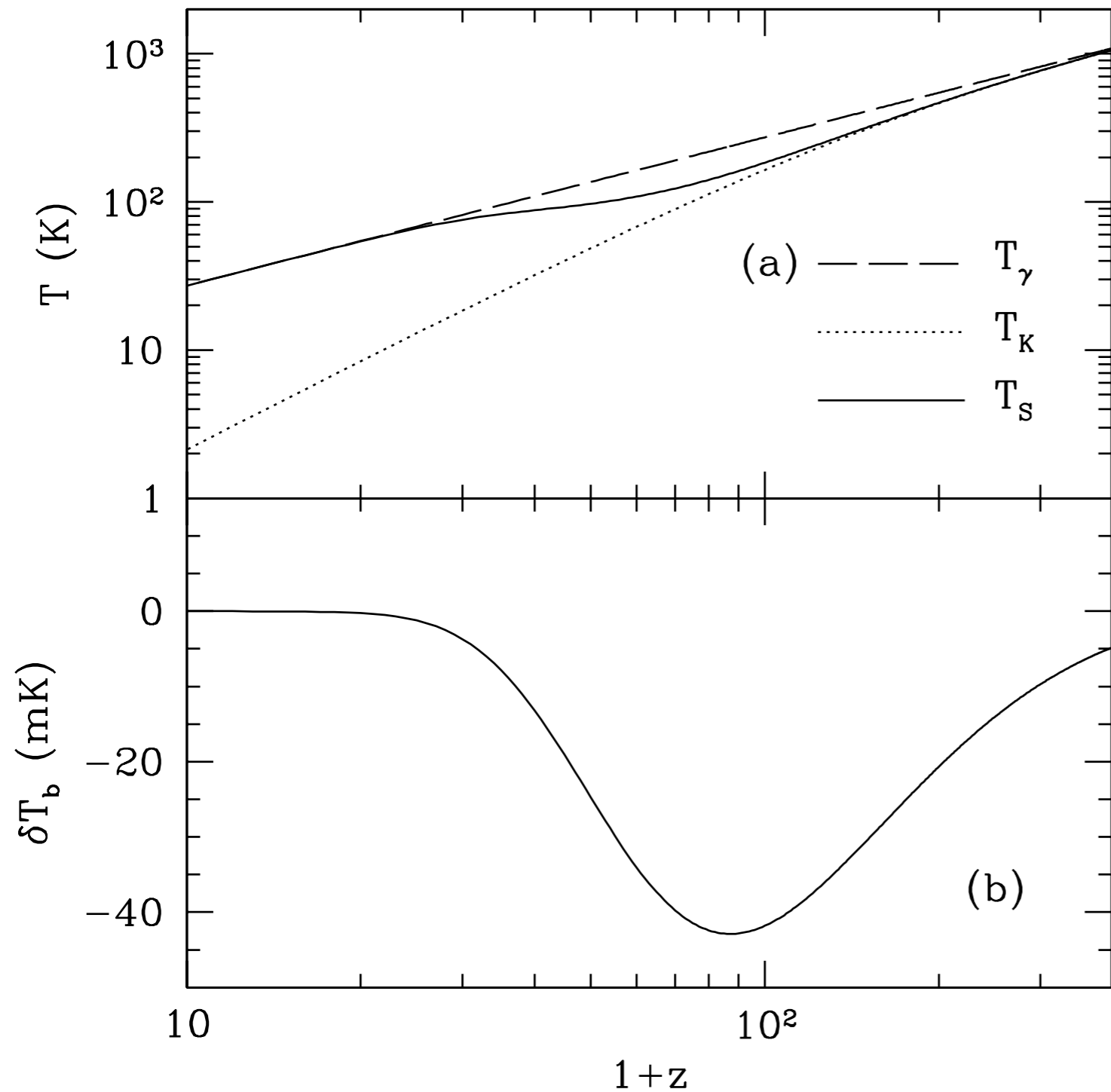
l'hydrogène neutre (HI)

dans l'espace

James E. Gunn & Bruce A. Peterson

ApJ. vol 142 , p. 1633-1641

(11/1965)



température du rayonnement
(CMB) T_γ

$$T_\gamma \propto (1 + z)$$

Température cinétique du gaz
(Hydrogène neutre) T_K

$$T_K \propto (1 + z)^2$$

Température de spin T_S

$$\frac{n_+}{n_-} = \frac{g_+}{g_-} \exp\left(-\frac{E_{21}}{kT_S}\right)$$

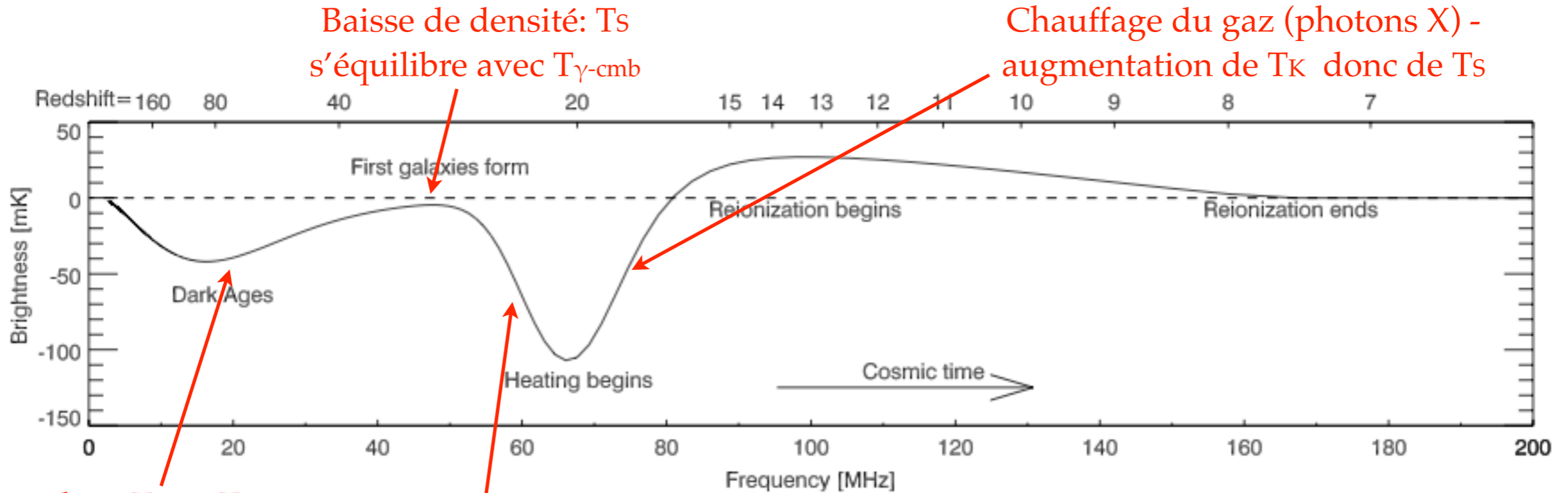
$$= 3 \exp\left(-\frac{T_*}{T_S}\right)$$

$$T_* \simeq 0.068K$$

S. Furlanetto, S. Peng Ho, F. Briggs, Phys.Rept. 433 (2006),
arXiv:0608032

**Pas de signal à 21 cm si $T_S = T_\gamma$
si observé sur le fond diffus (CMB)**

HI et Température de brillance à 21 cm



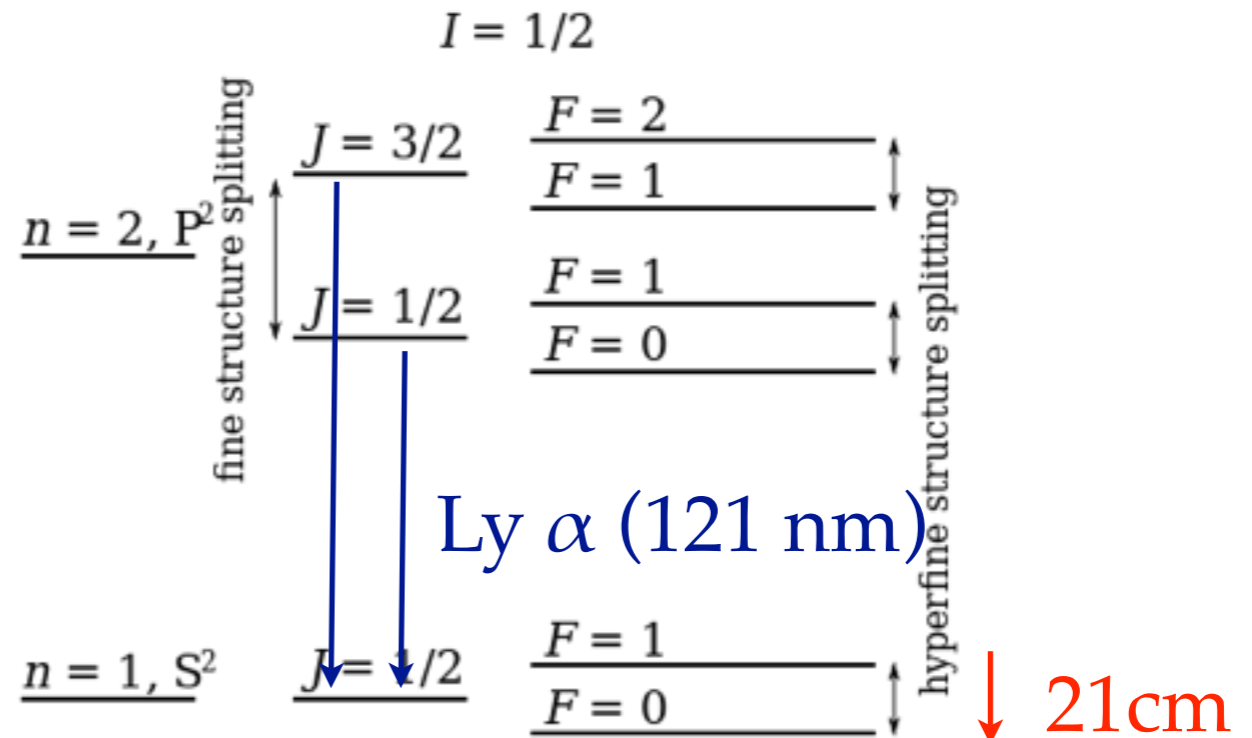
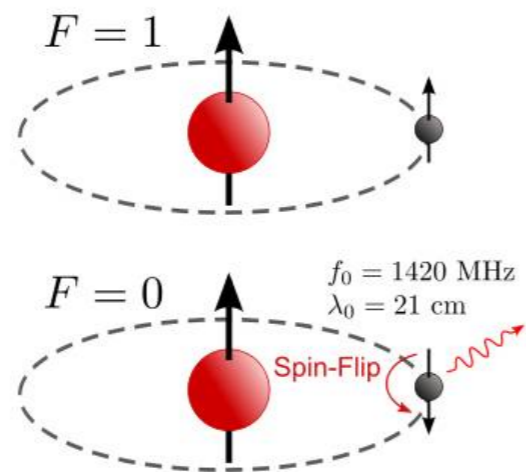
Baisse de densité: T_s s'équilibre avec $T_{\gamma-cmb}$

Chauffage du gaz (photons X) - augmentation de T_K donc de T_s

Couplage $T_s \leftrightarrow T_K$ à travers les collisions

Couplage $T_s \leftrightarrow T_K$ à travers l'effet Wouthuysen-Field, dans le bain des photons UV des premières étoiles

A. Liu, J.R. Pritchard, M. tegmark, A. Loeb. (2012), arXiv:1211.3743



LSS & BAO à 21 cm

3D Intensity mapping

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

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

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

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

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

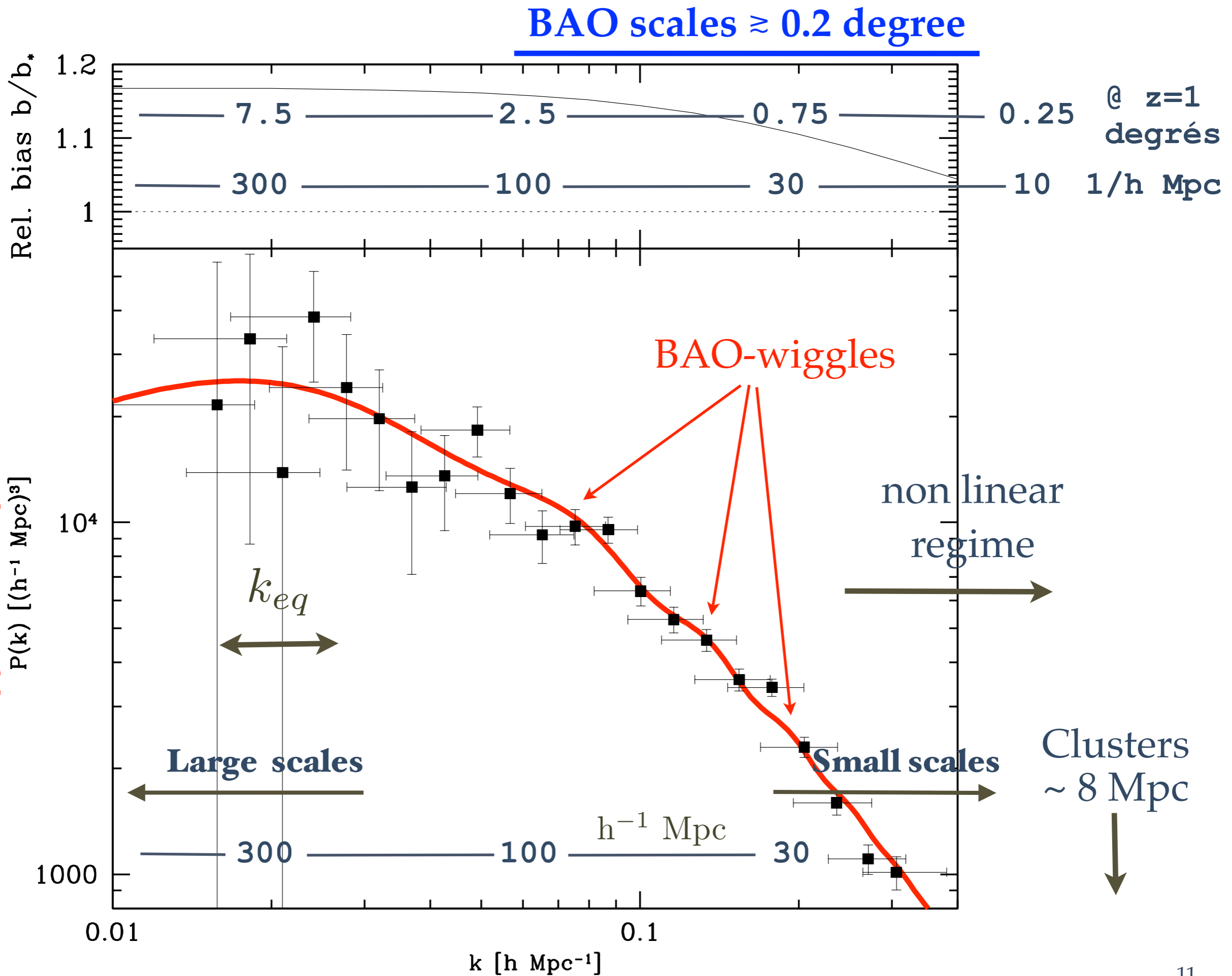
A (m ²)	Tsys (K)	Slim
5000	50	66
5000	25	33
100000	50	3.5
100000	25	1.7

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 !

SDSS - M. Tegmark et al.

ApJ, astro-ph/03010725



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 $< 5 \text{ e}$) 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 $T_{21}(\alpha, \delta, z)$

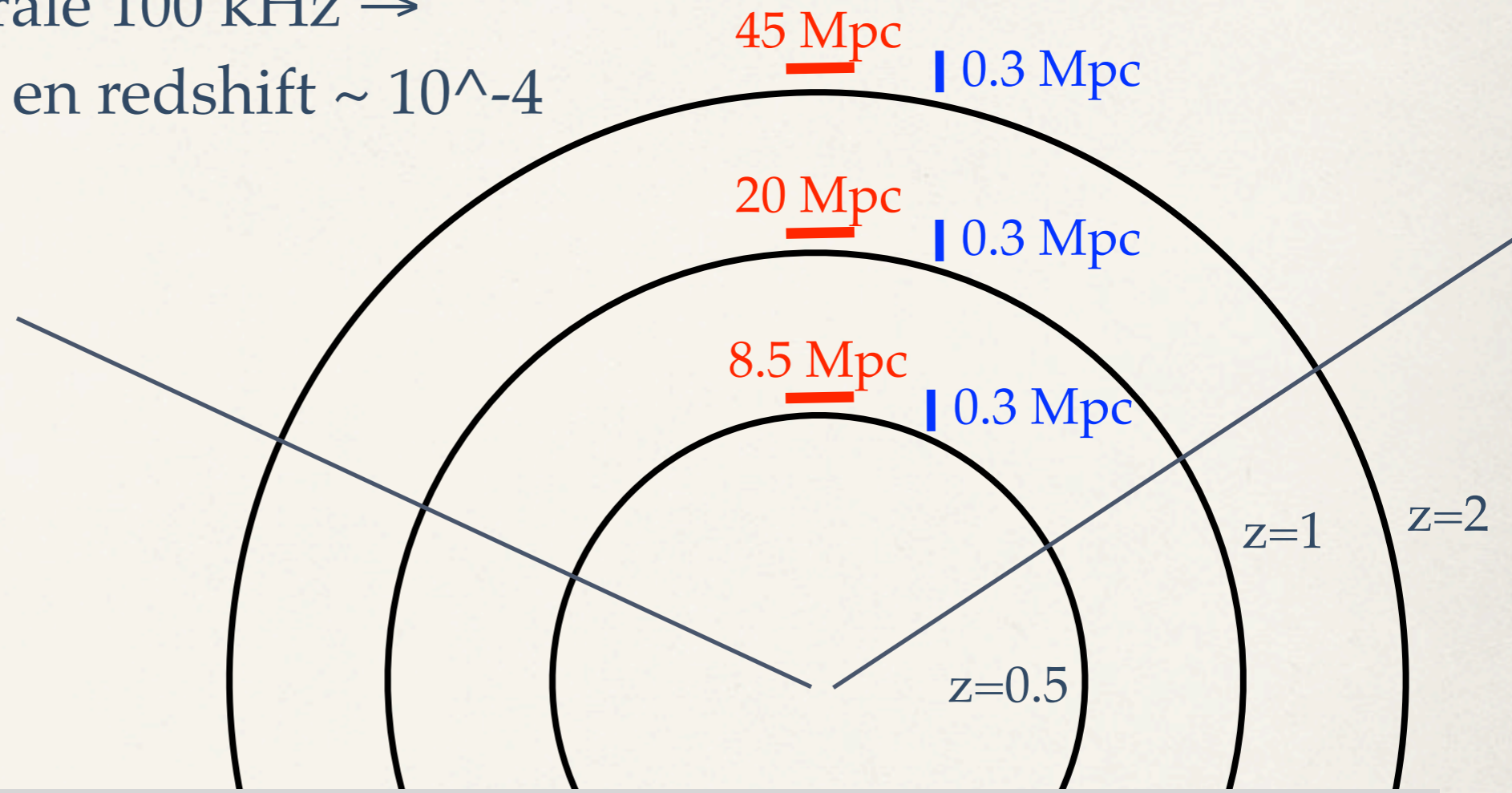
- 📍 Cartographie 3D de la distribution de l'hydrogène neutre par la mesure du spectre d'émission totale radio en bande L sans identification des sources
- 📍 Une résolution angulaire modeste (10-15 arcmin) est suffisant
- 📍 Nécessite un grand champ de vue (FOV) et une large bande (BW) instantanés
- 📍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

≡ Bruit instrumental / environnemental (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

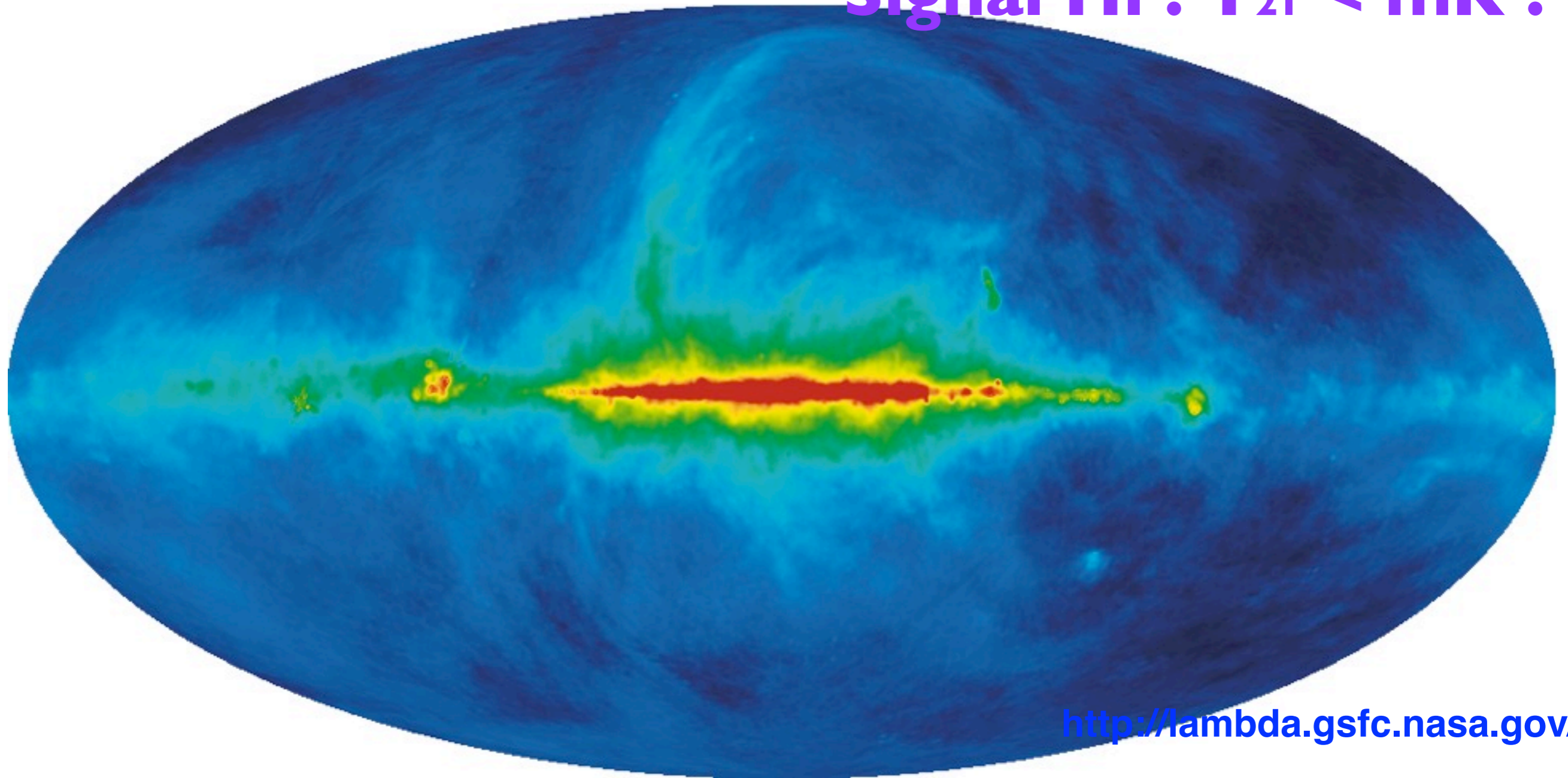
Réseau de $L=100$ m \rightarrow resol. angulaire
 $\sim \lambda/L$, se détériore avec le redshift z
 résolution spectrale 100 kHz \rightarrow
 excellente résolution en redshift $\sim 10^{-4}$



z	$\delta\theta$	d_{LOS}	H	δd_{\parallel}	δd_{\perp}
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

Avant-plans

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



<http://lambda.gsfc.nasa.gov/>

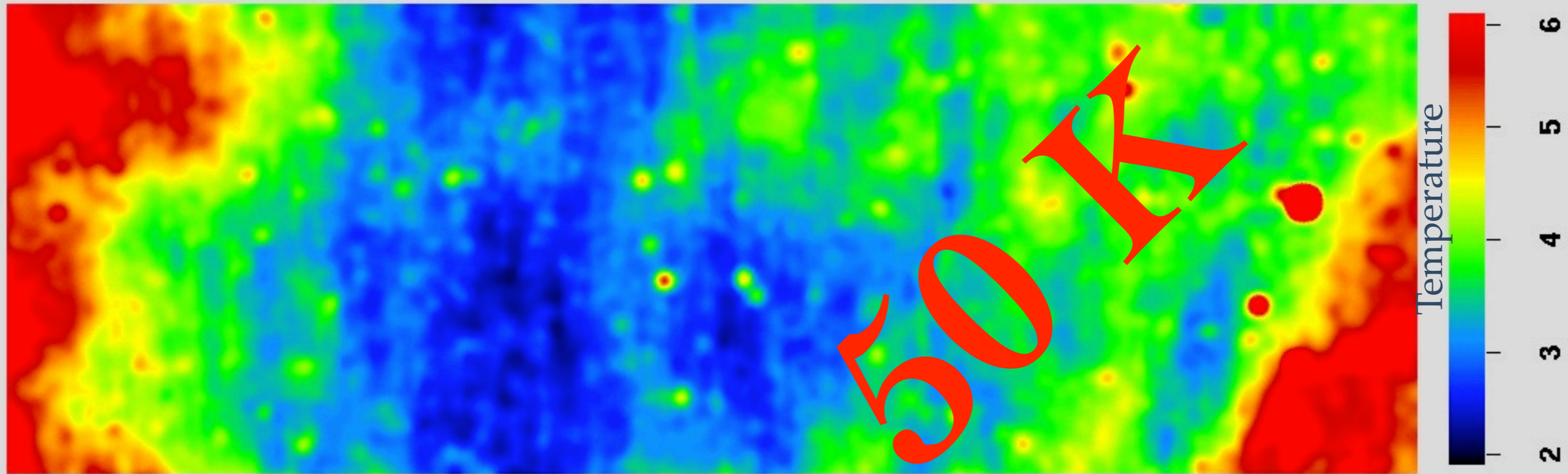
10 K **Temp. T (Ech. Log)** **250 K**

Haslam 408 MHz map (Galactic
synchrotron emission)

R. Ansari

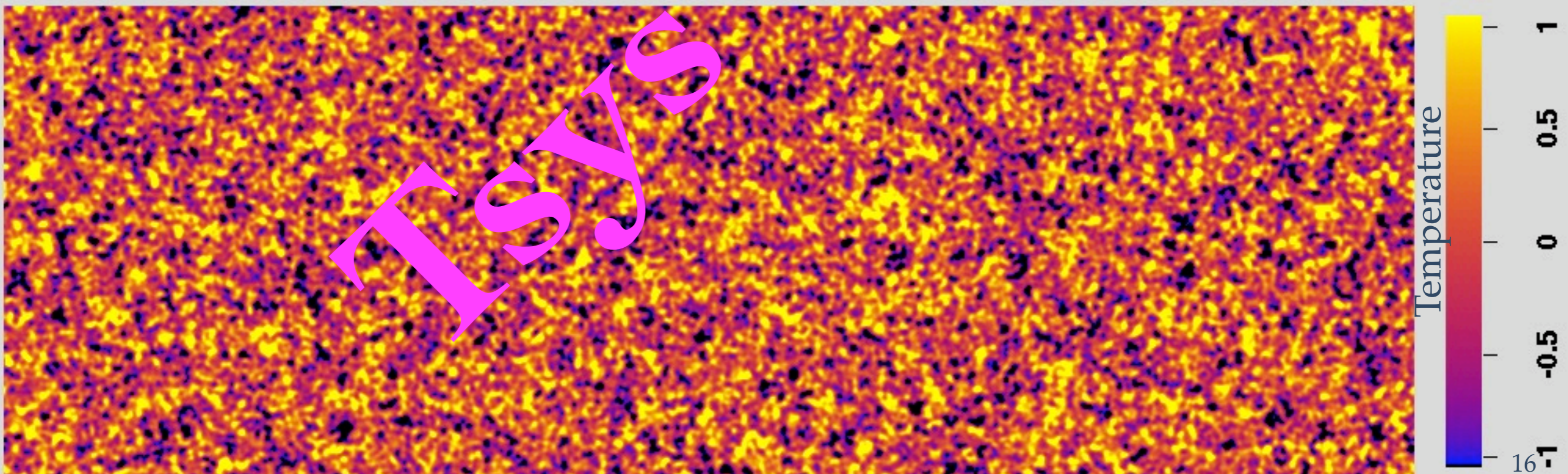
Radio foreground (GSM) @ 720 MHz (z=1.) - Kelvin

K



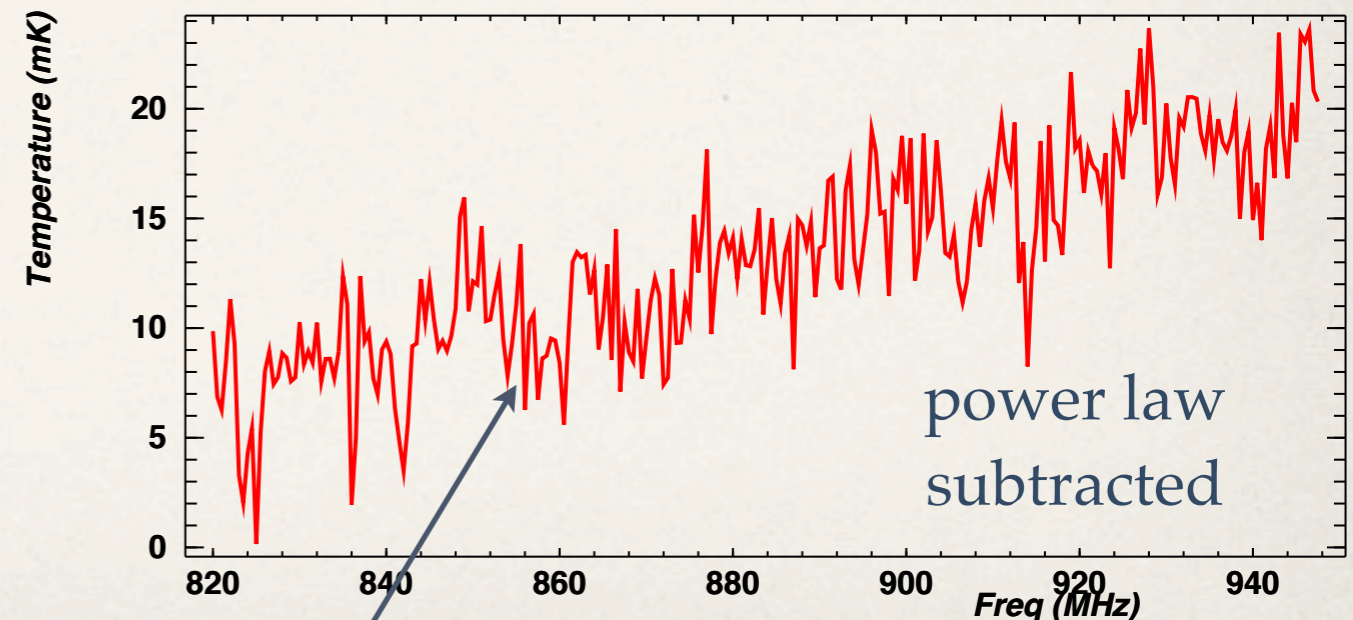
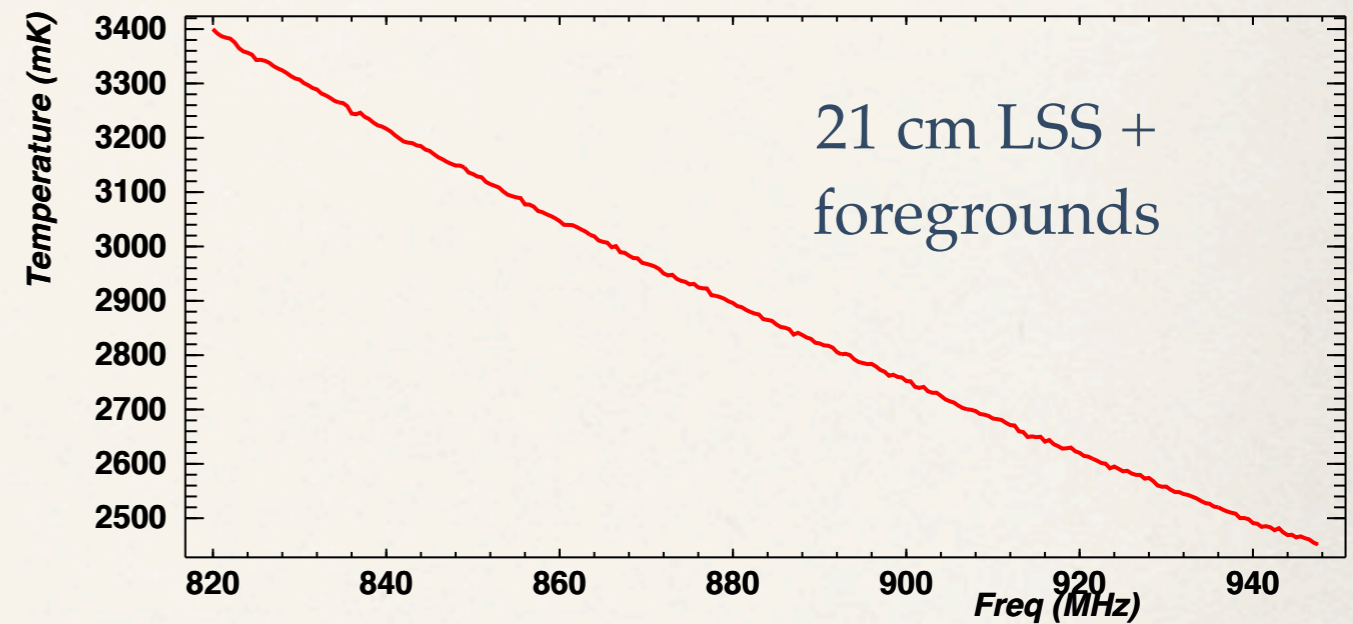
21 cm sky brightness @ 720 MHz (z=1.) - milliKelvin

mK



Suppression des avant-plans

- ❖ Exploiter la dépendance spectrale des avant-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

BAORadio de 2007 à 2015



21
cm

BAO Radio

Observatoire de Paris

LAL - IN2P3/CNRS

IRFU - CEA

P. Colom

J.M. Martin

J. Borsenberger

J. Pezzani

F. Rigaud

S. Torchinsky

C. Viou

R. Ansari

J.E. Campagne

M. Moniez

A.S. Torrento

D. Breton

C. Beigbeder

T. Cacaceres

D. Charlet

B. Mansoux

C. Pailler

M. Taurigna

C. Magneville

C. Yèche

J. Rich

J.M. Legoff


P. Abbon

E. Delagnes

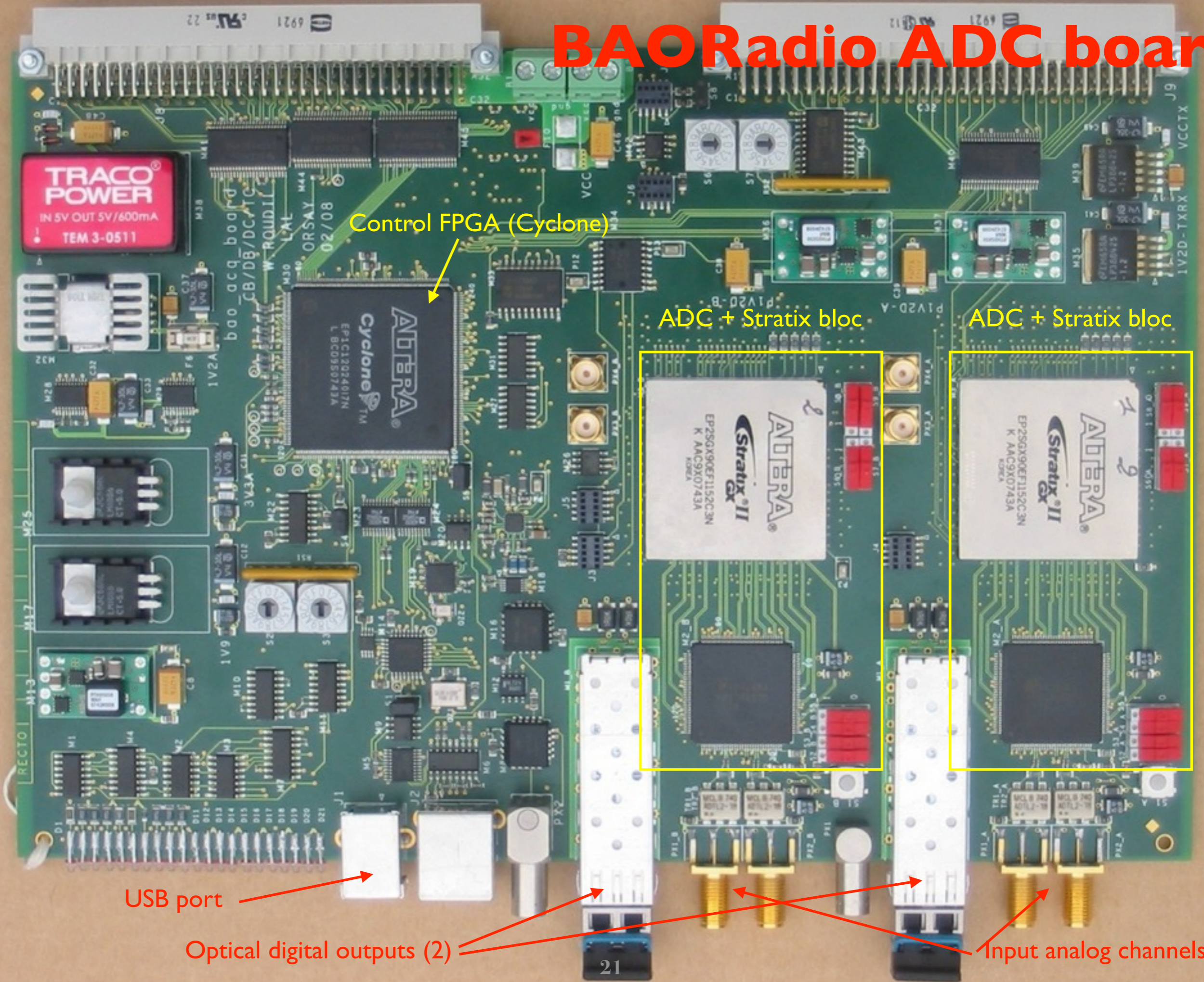
H. Deschamps

C. Flouzat

P. Kestener

- 
- 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 HI Cluster, 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



Control FPGA (Cyclone)

ADC + Stratix bloc

ADC + Stratix bloc

USB port

Optical digital outputs (2)

Input analog channels (4)

21

CRT (CMU, Pittsburgh)

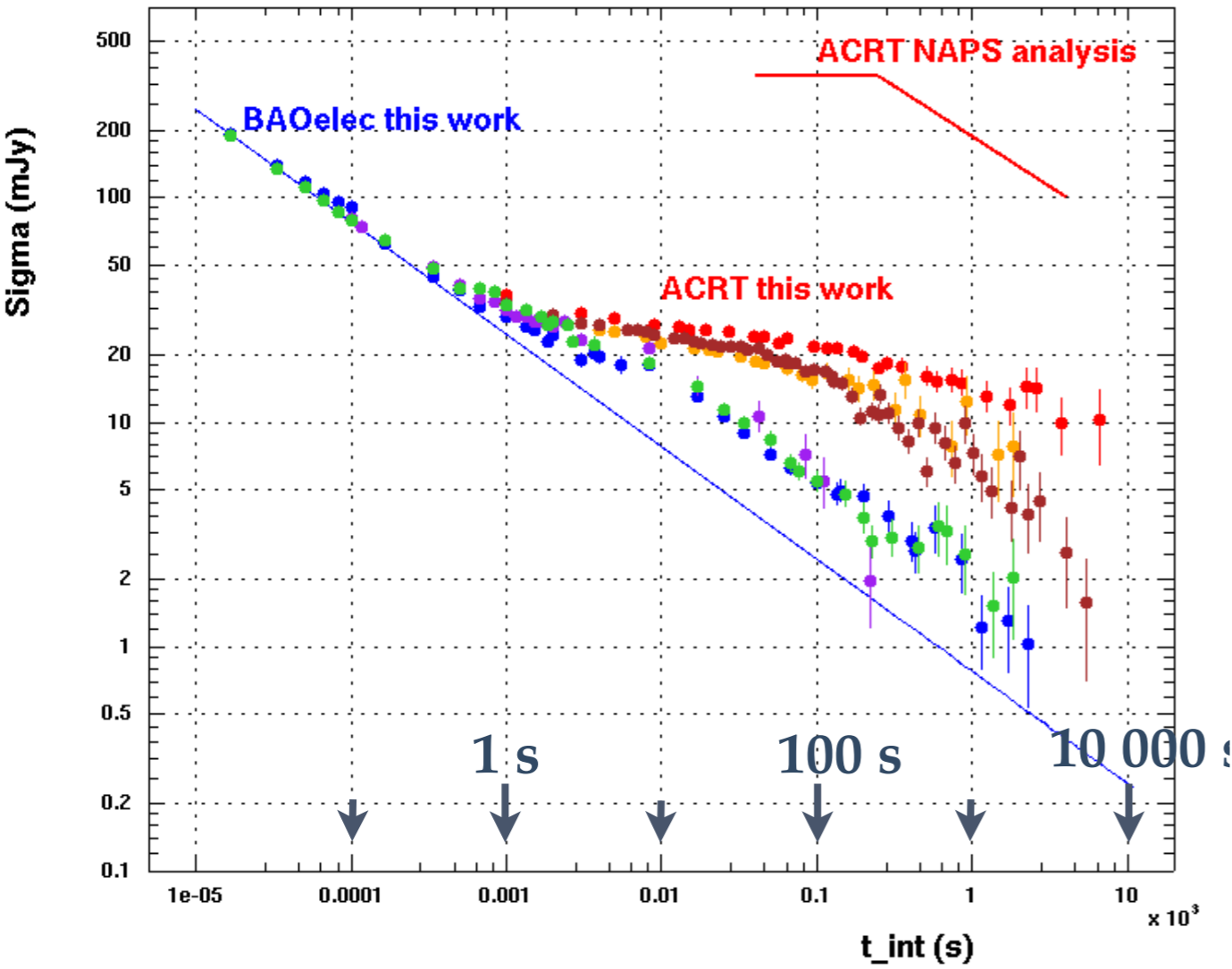


BAORadio @ CRT-Pittsburgh -
Nov 2009

Programme HI Cluster 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-correlator standard ACRT
- ❖ Total ~ 10 -20 heures / cible - observations réparties sur \sim une année
- ❖ Calibration, nettoyage RFI cleaning, 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

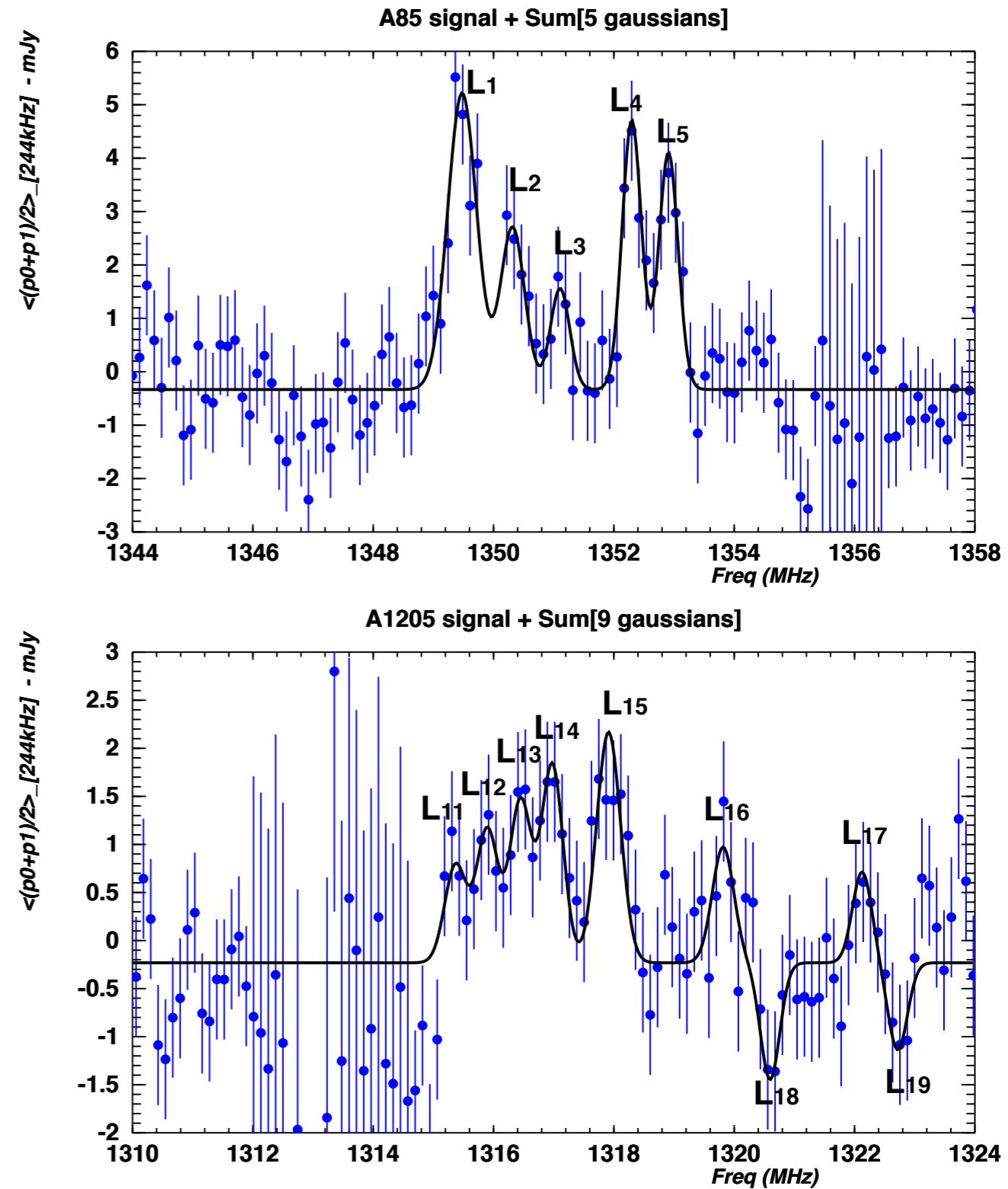
Courbe de sensibilité (radiometer curve) HI-Cluster, BAORadio & NRT correlator



HI Cluster

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

Signal HI A85 / A1205



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 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 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 $1 \text{ deg} \times 1 \text{ MHz}$ pixels) -
Vérification de la stabilité instrumentale sur le long terme

PAON Test Interferometer

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



PAON-4

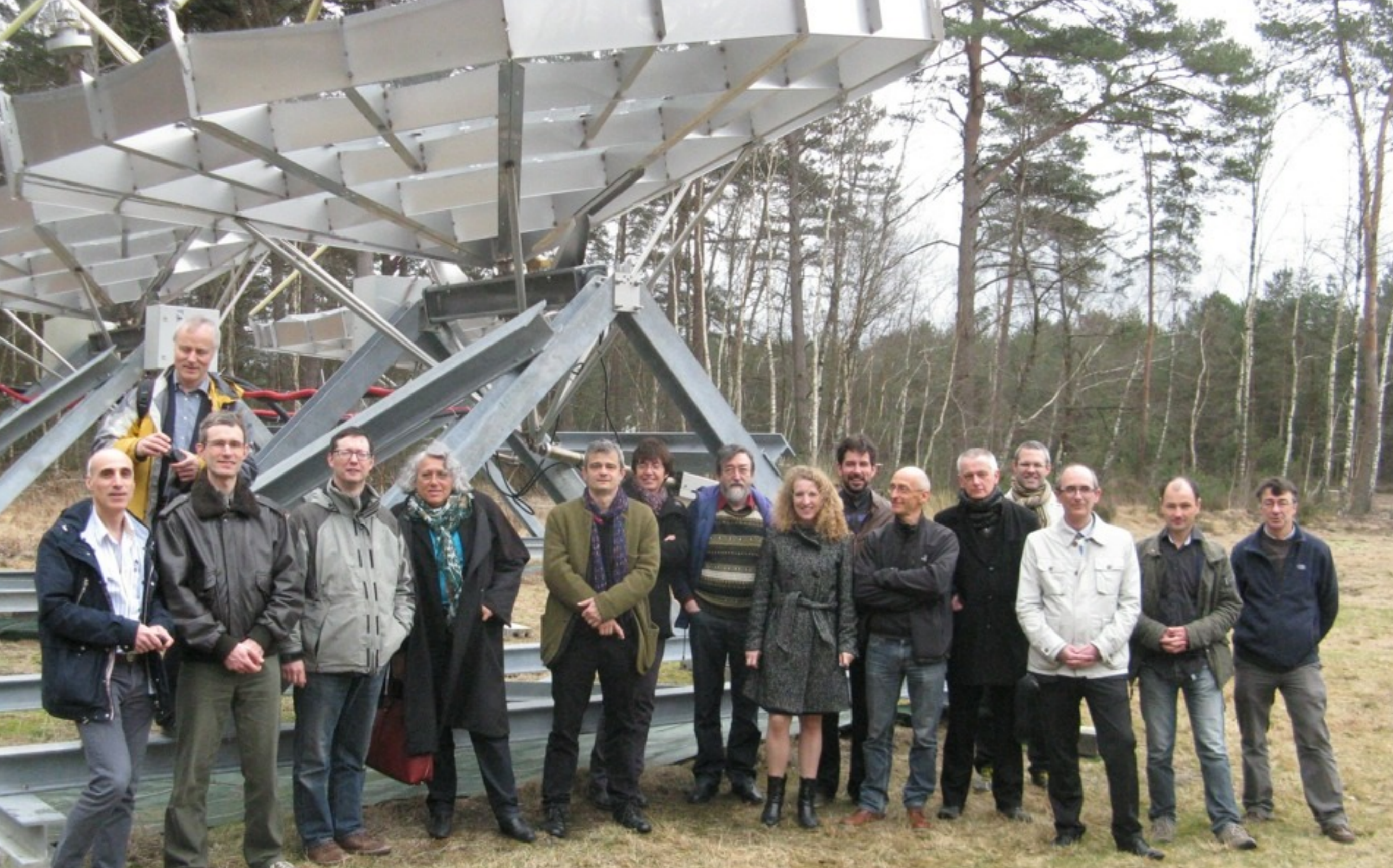
(F. Rigaud)

4 D=5m dishes



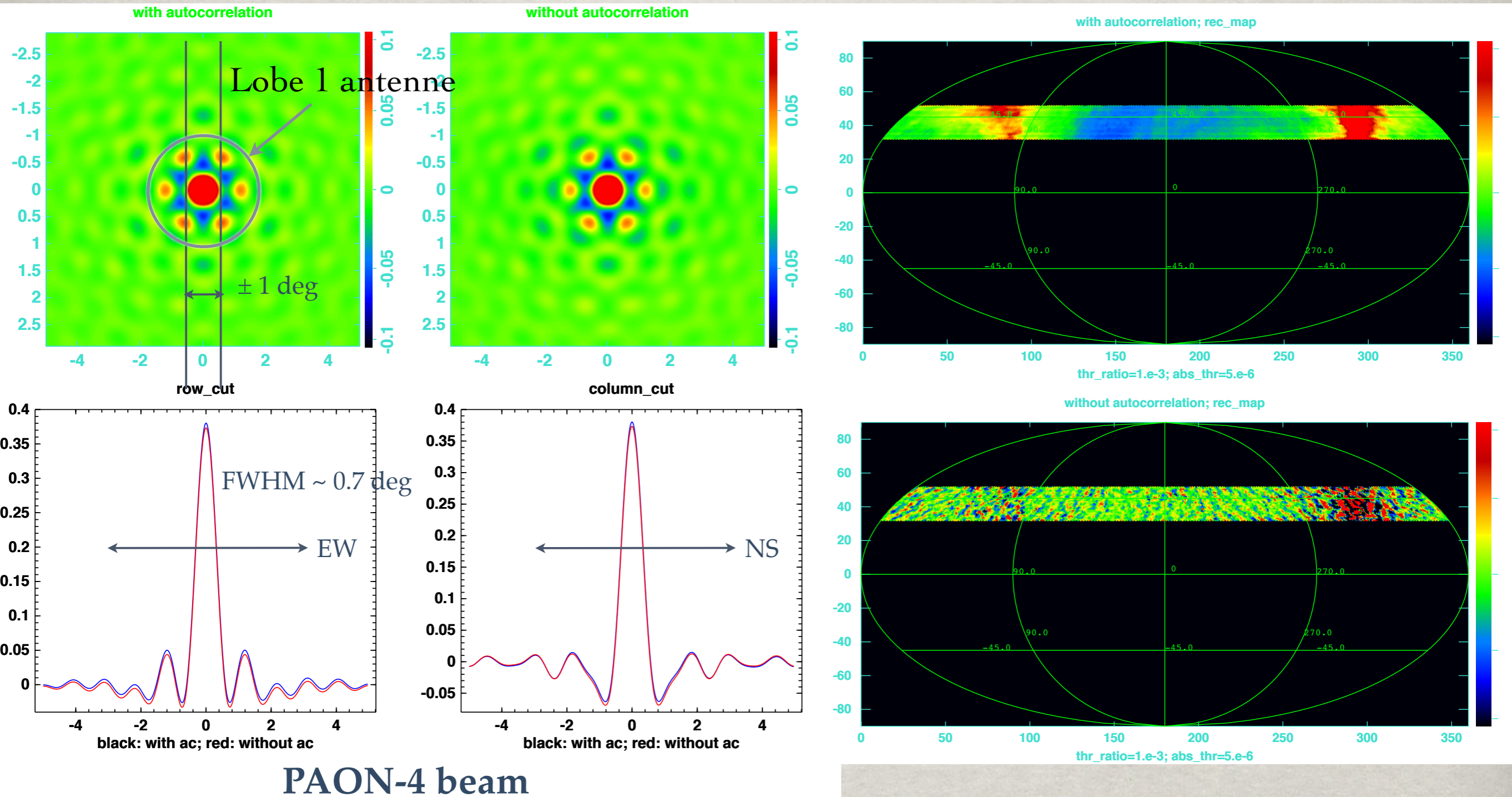
PAON-2 →

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

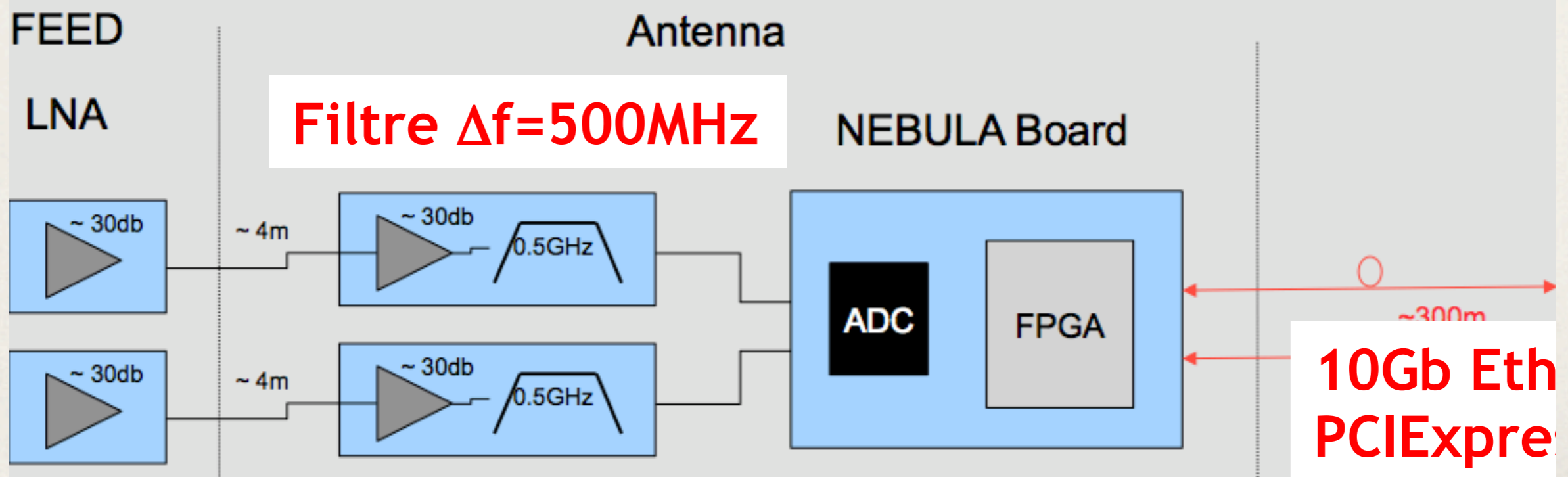
PAON-4 : lobes, cartes reconstruites (simulations)



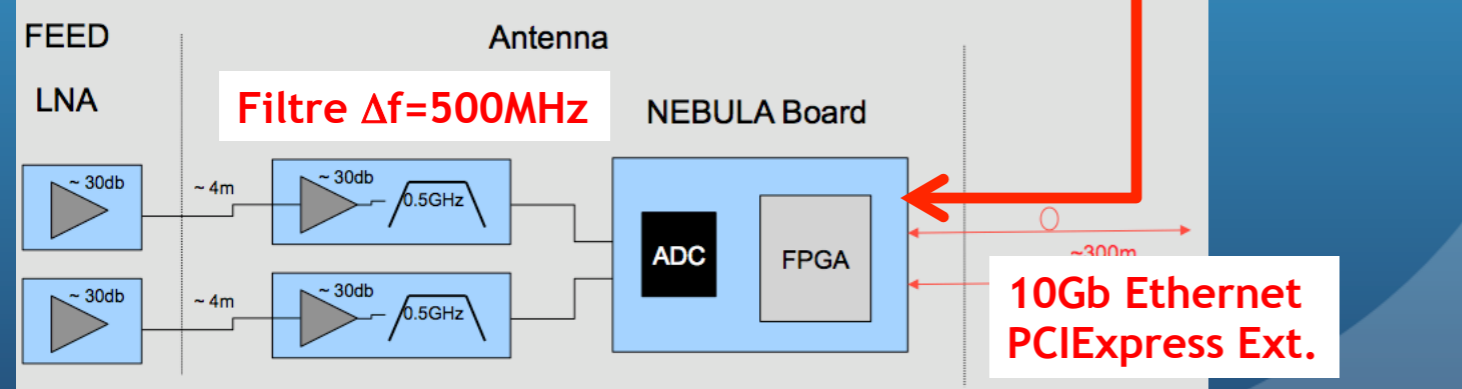
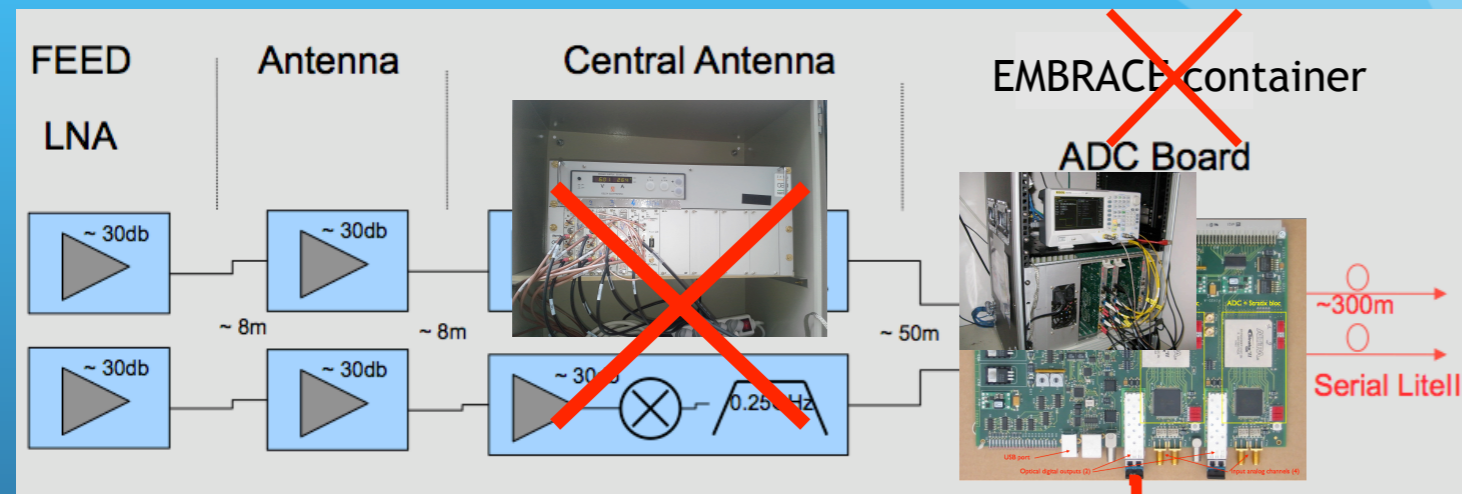
J. Zhang, reconstruction de cartes pour interféromètre en mode transit (thèse en cotutelle avec le NAOC)

NEBuLA

- Projet **Nançay-LAL-Irfu** accepté par le CS Obs. de Paris (CSAA) **Décembre 2013, 17k€** (proto) Porteurs: **Cédric Viou** (Nançay) & **Daniel Charlet** (LAL)
- Par rapport à l'électronique actuelle dont le design date de 2006-7:
 - On s'affranchit de la partie Mélangeur
 - On réduit la longueur du câble coax.
 - On passe de **250 MHz à 500 MHz** de bande
 - Transmission passe à **100%** de temps Ciel
 - **Ethernet & PCI Express Externe** (accès direct mémoire des PCs)
 - à usage PAON et NRT/RadioHéliostat, voire TIANLAI



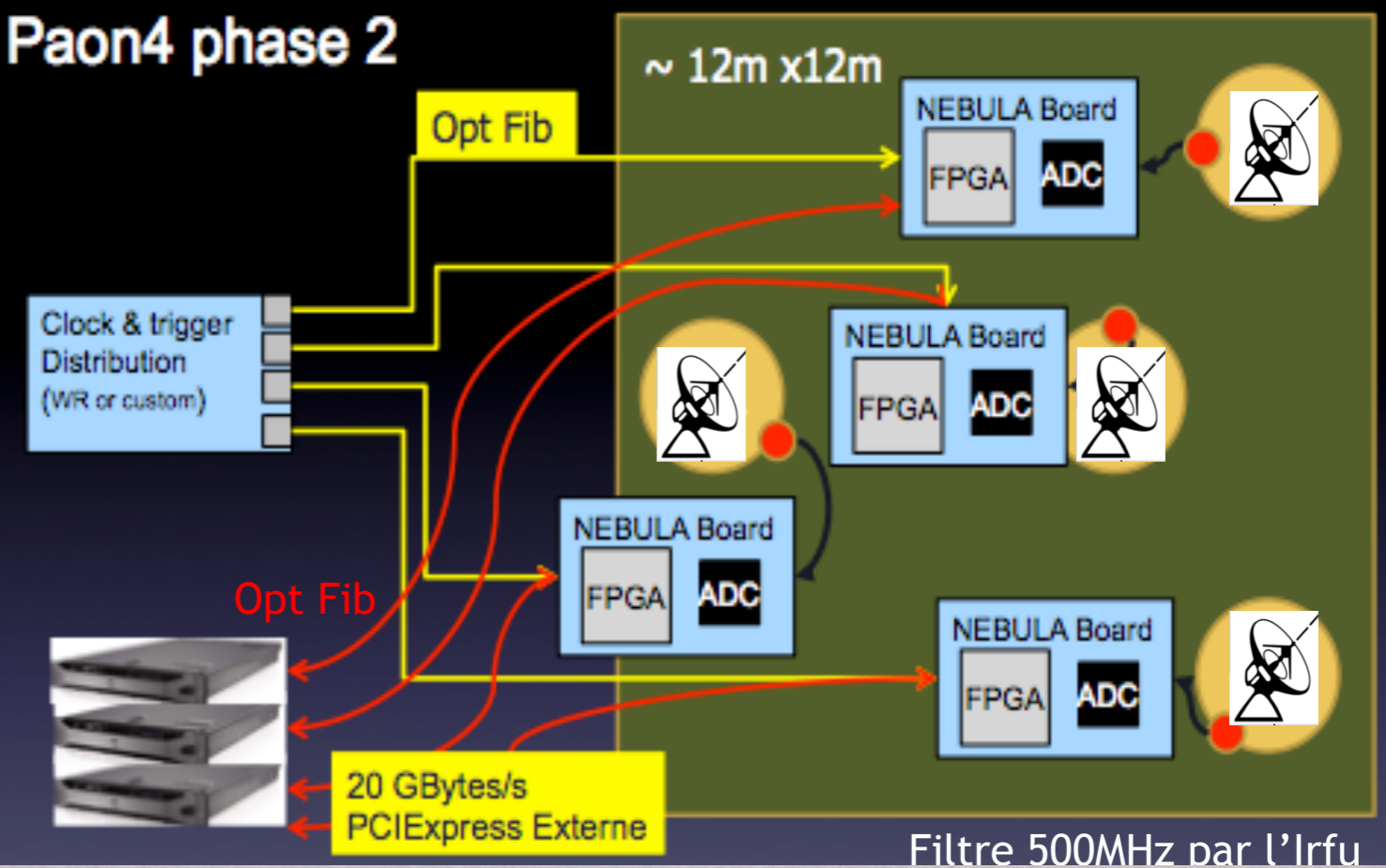
Evolution vers NEBuLA



J.E. Campagne - IAF - 16/9/15

NEBuLA / PAON-4 Phase 2

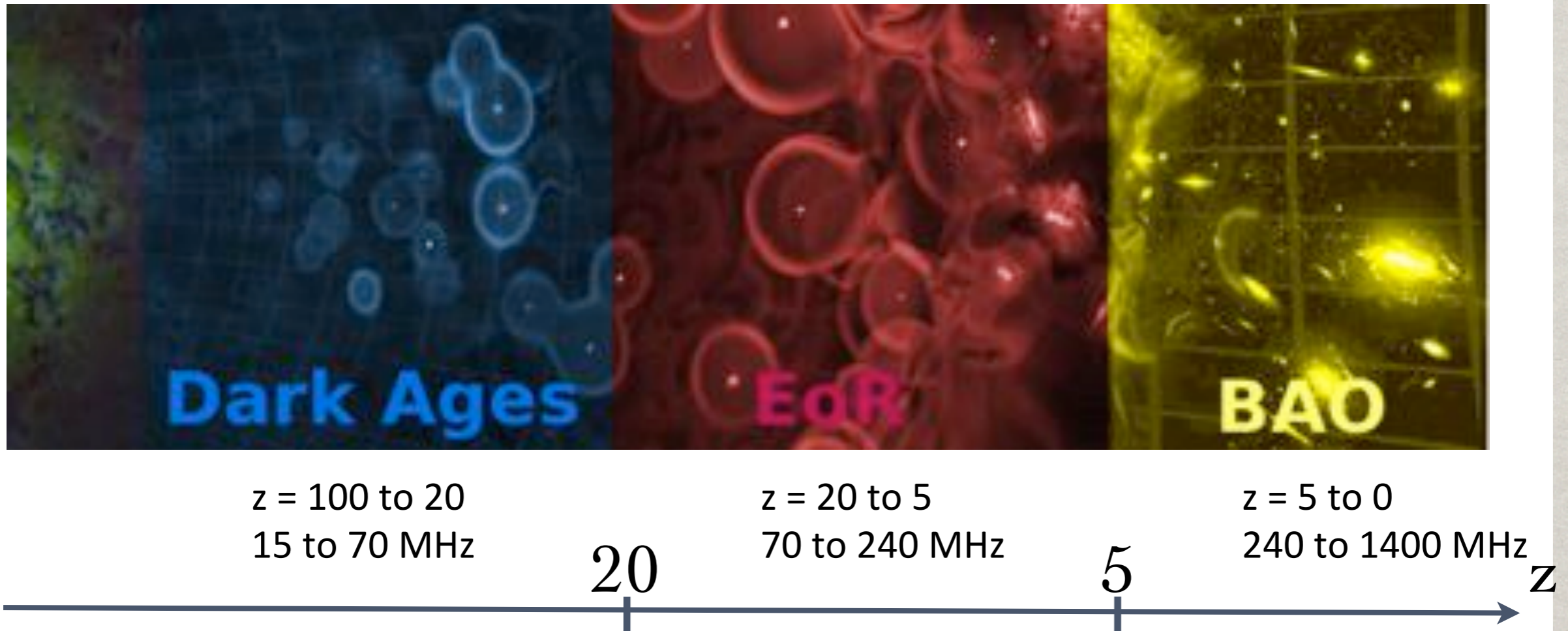
Paon4 phase 2



(CHIME), HIRAX et Tianlai

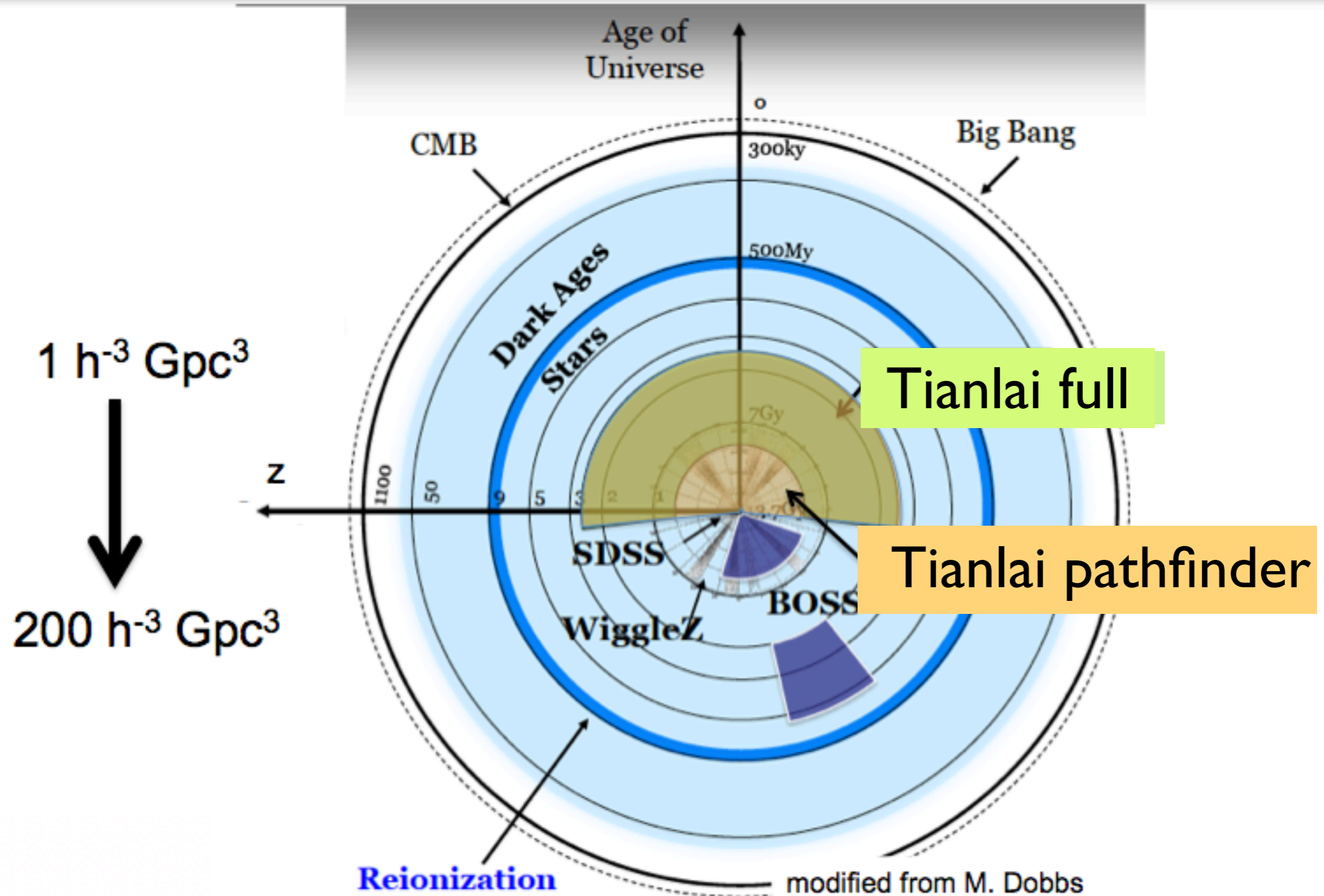
21 cm projects

- CHIME
- Tianlai
- HIRAX
- GBT/Parkes
- BAOBAB/BINGO



- LOFAR
- GMRT
- MWA
- SKA
- HERA

21 cm surveys can explore huge comoving volumes



Slide: P. Timbie (adaptation par J.E. Campagne)

CHIME

(Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment)

Prototype

2, 8m dishes
4 channels

Pathfinder

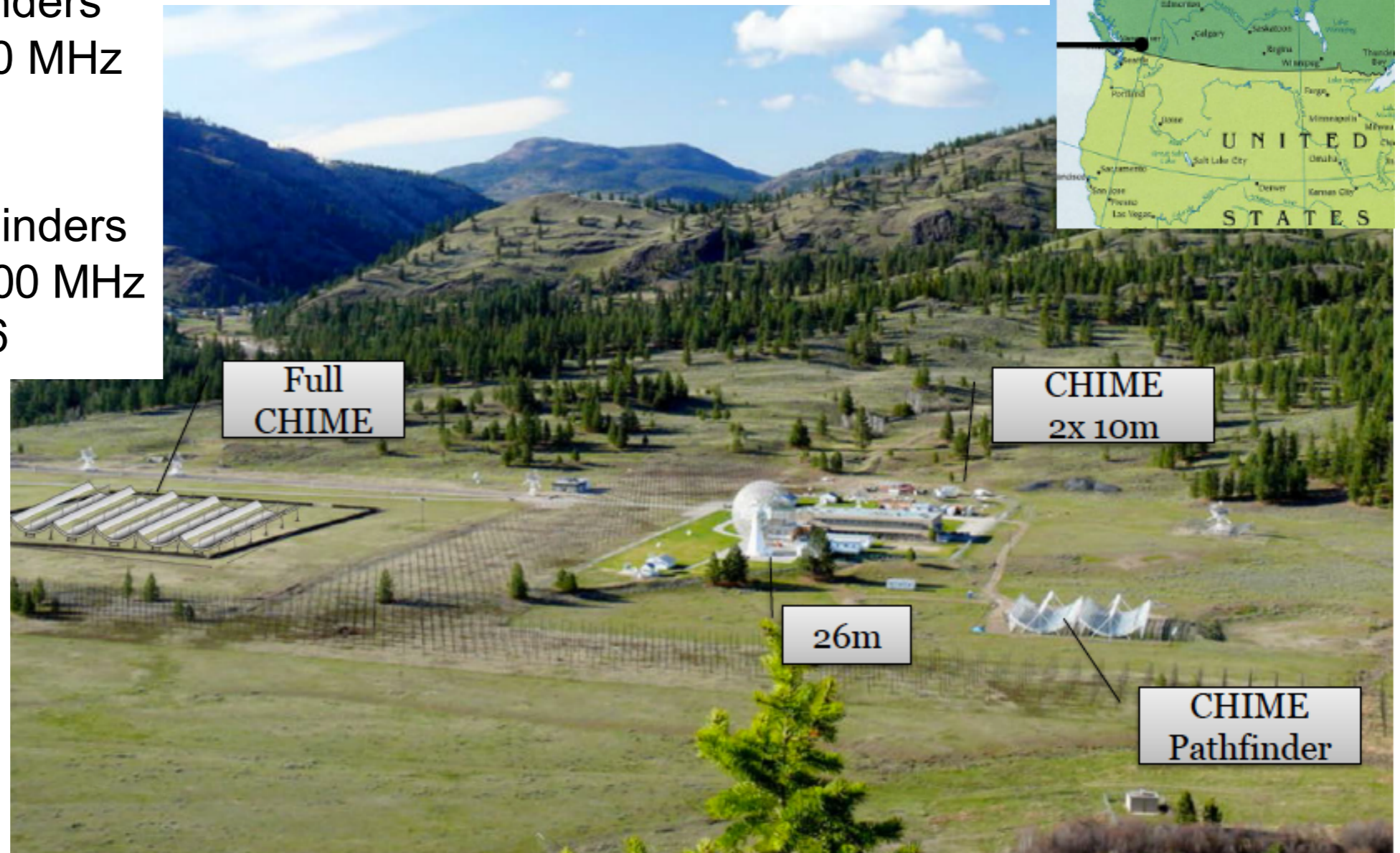
2, 20mx40m cylinders
256 channels, 400 MHz

Full CHIME - funded

4, 20mx100m cylinders
1280 channels, 400 MHz
operating in 2016

UBC
DRAO
McGill
NRC-CNRC
Toronto

Slide: P. Timbie

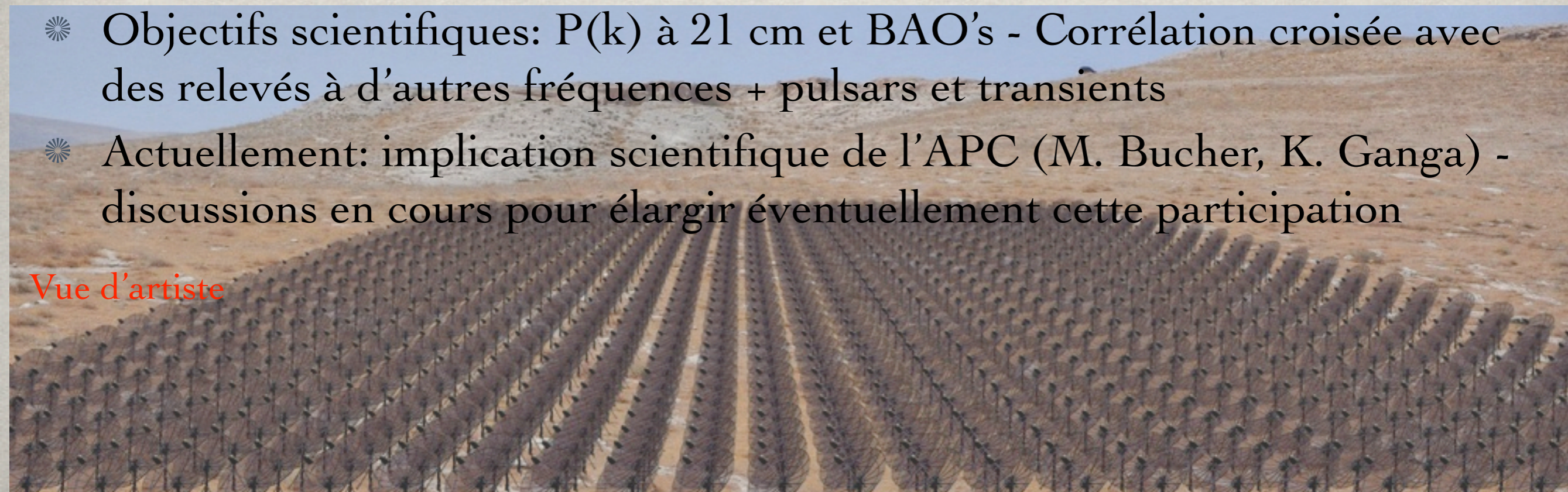


HIRAX

(a southern hemisphere 21 cm BAO survey)

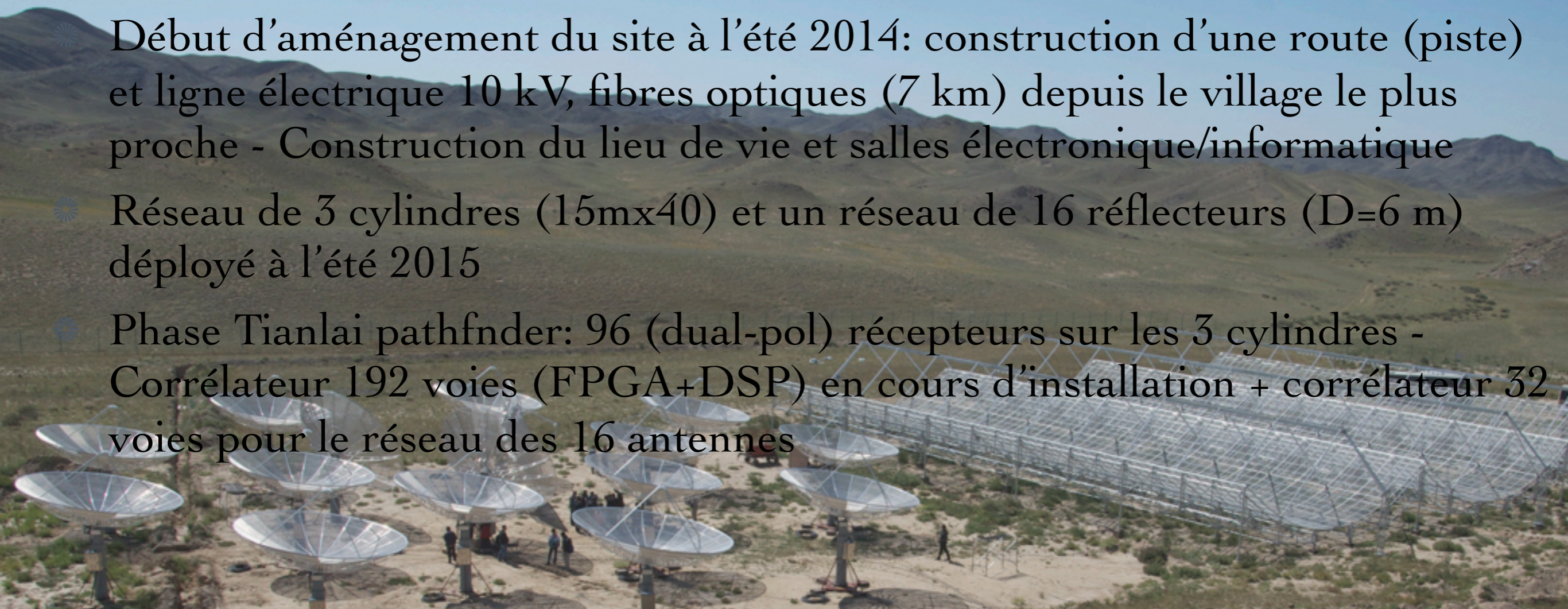
- ✿ Projet mené par l'Afrique du Sud (PI: J. Sievers) en partenariat avec Canada, États-Unis, France
- ✿ Financement (NRF / AFS) pour une première phase (réseau de 128 réflecteurs?) obtenu été 2015
- ✿ Situé sur le site SKA dans le désert de Karoo, un des meilleurs sites mondiaux de radioastronomie (protégé par la législation sud-africaine)
- ✿ Complémentaire avec des relevés similaires de l'hémisphère nord (CHIME, Tianlai) - couverture en z : 0.8 ... 2
- ✿ Objectifs scientifiques: $P(k)$ à 21 cm et BAO's - Corrélation croisée avec des relevés à d'autres fréquences + pulsars et transients
- ✿ Actuellement: implication scientifique de l'APC (M. Bucher, K. Ganga) - discussions en cours pour élargir éventuellement cette participation

Vue d'artiste

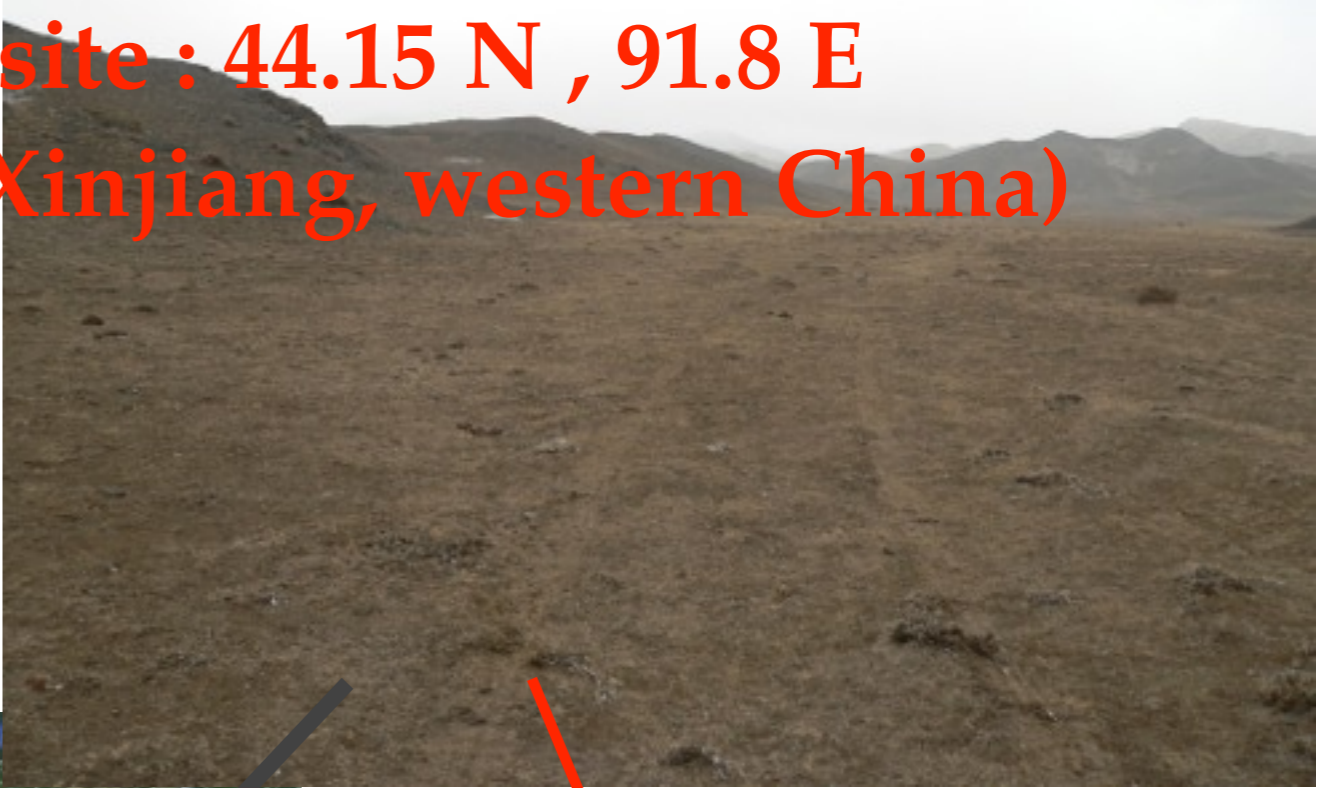


TIANLAI

- ✿ Projet mené par le NAOOC (PI: X. Chen) en partenariat avec Canada, États-Unis, Corée du Sud, France
- ✿ Collaboration constitué 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



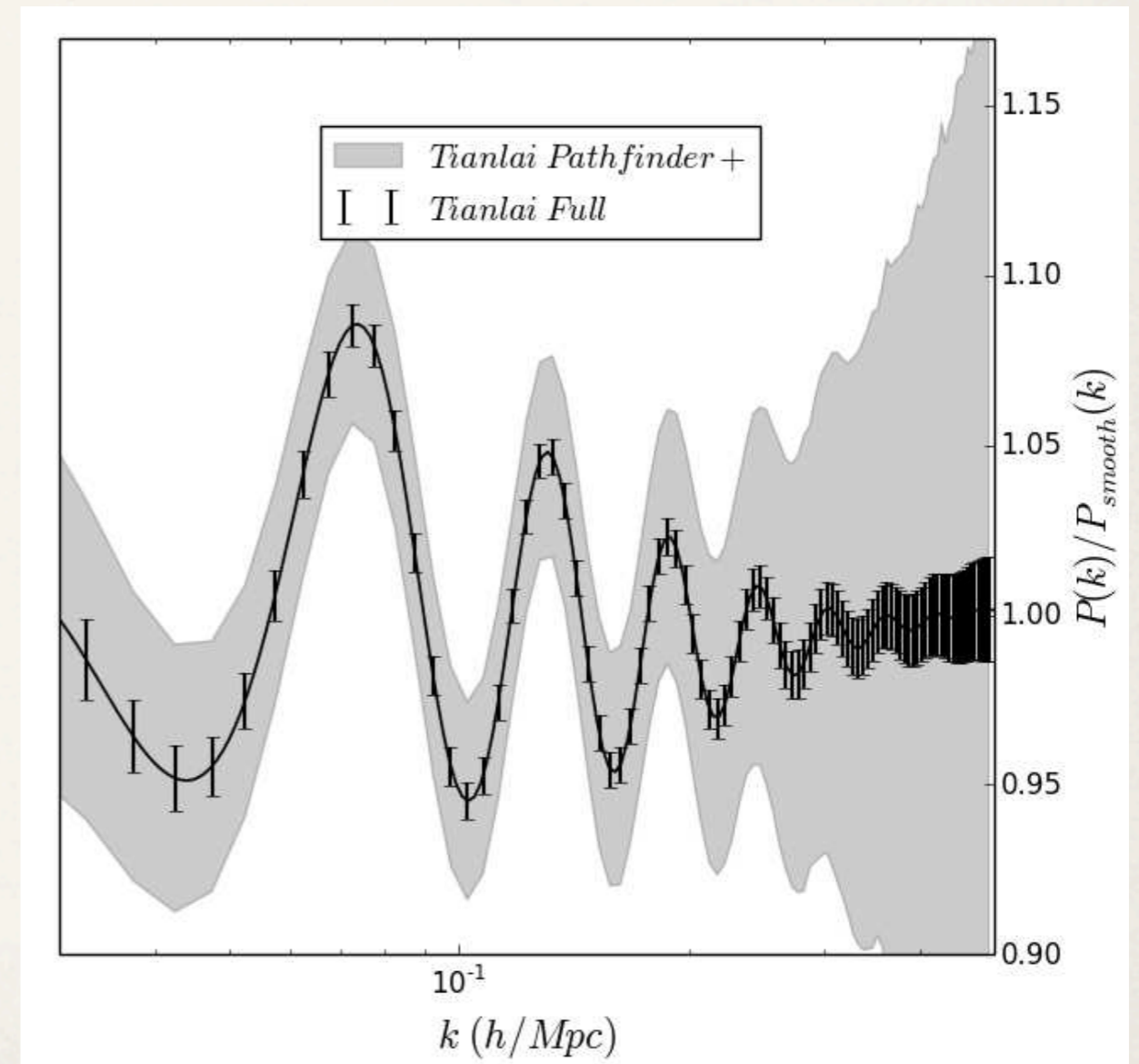
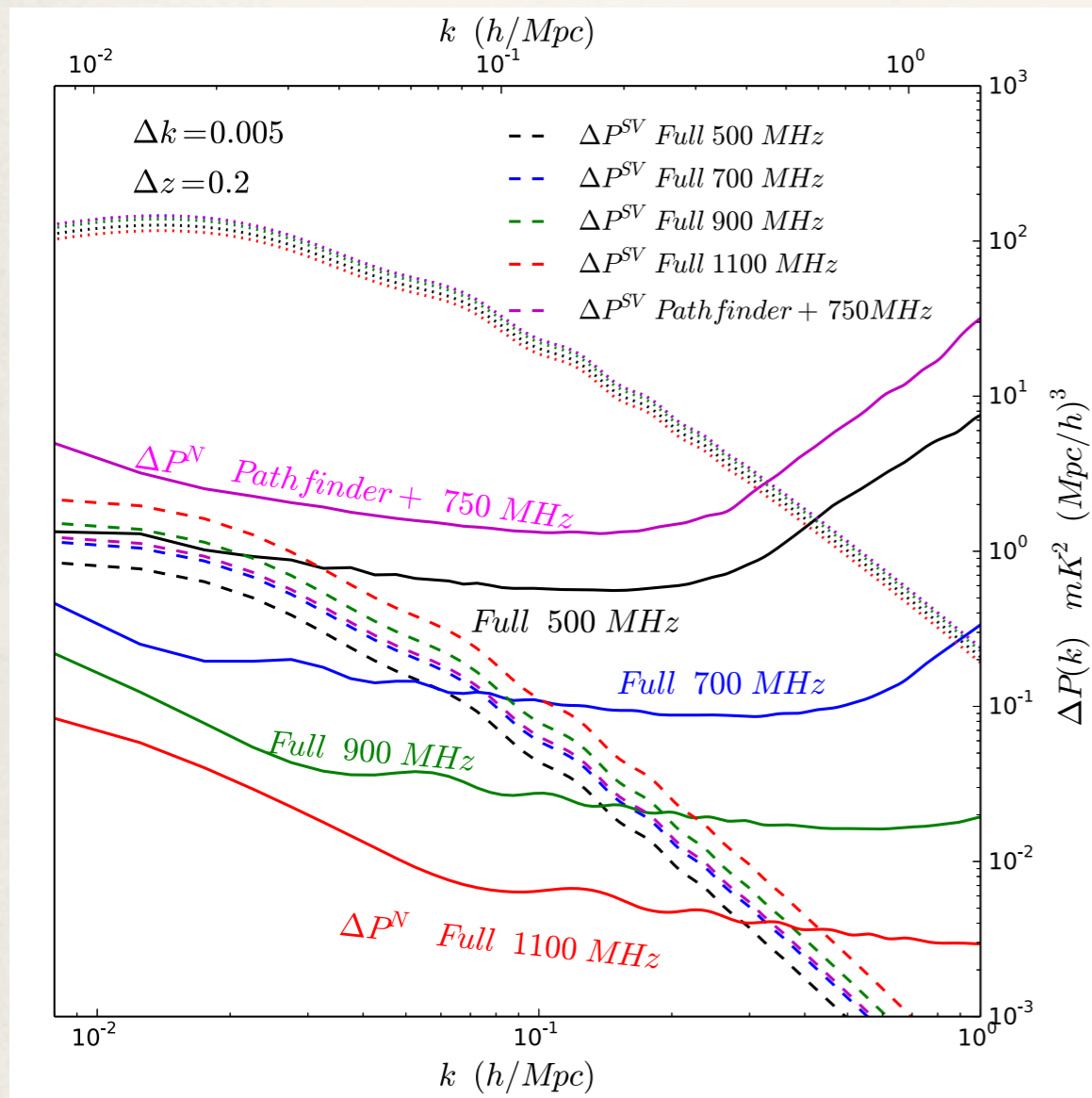
Tianlai site : 44.15 N , 91.8 E
Hongliuxia Xinjiang, western China)



TIANLAI

Table 1: The experiment parameters for Tianlai.

	cylinders	width	length	dual pol.	units/cylinder	Frequency
Pathfinder	3	15 m	40 m		32	700 – 800 MHz
Pathfinder+	3	15 m	40 m		72	700 – 800 MHz
Full scale	8	15 m	120 m		256	400 – 1420 MHz

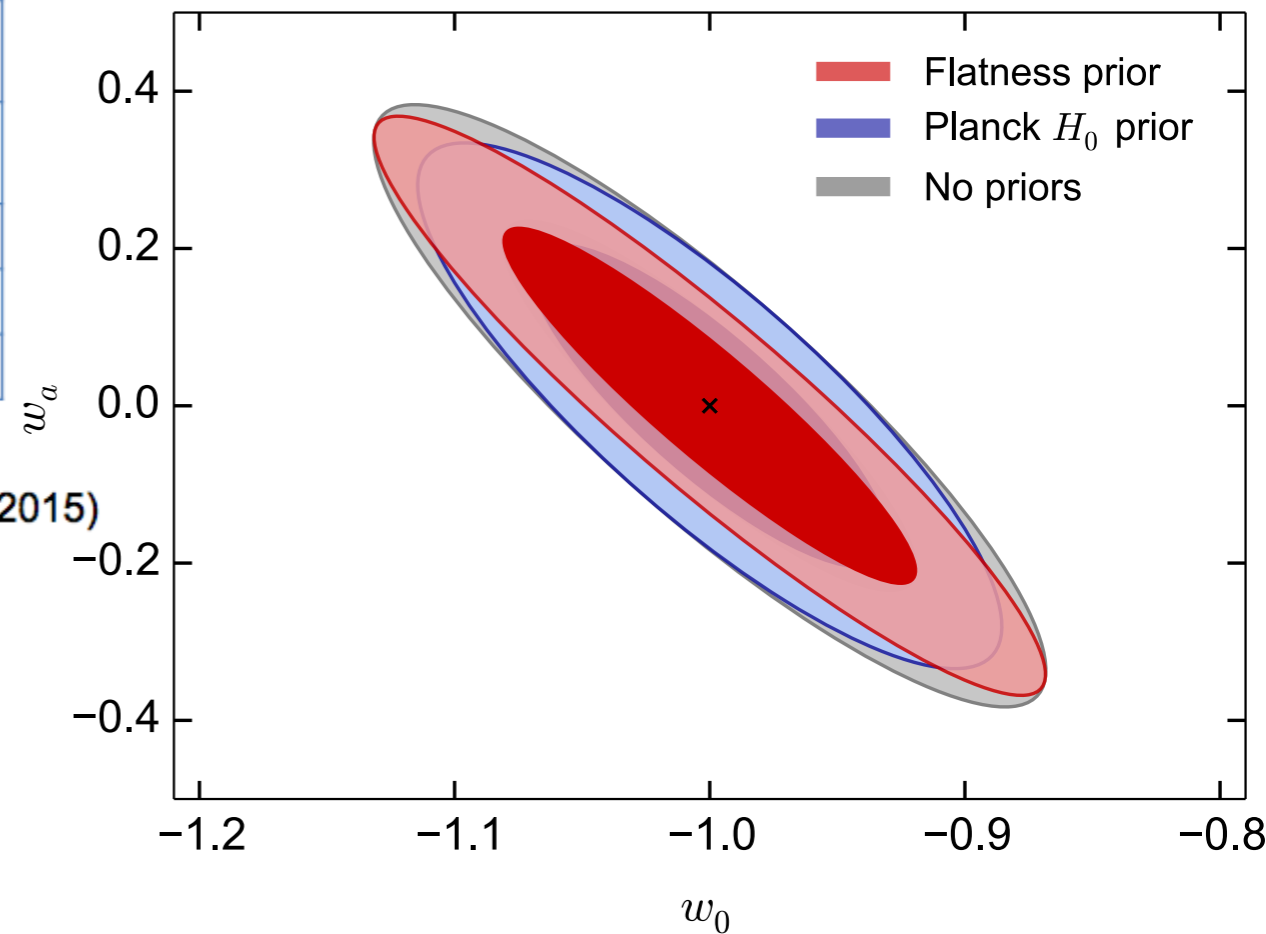


Y. Xu, X. Wang, X. Chen (2015) - ApJ
 arXiv:1410.7794

Comparaison des différents projets BAO à 21 cm

	T_{inst}	$N_d \times N_b$	D_{dish} (m)	z_{min}	z_{max}	S (deg ²)
single dish	GBT	1x1(7)	100	0.54	1.09	100
	Parkes	1x13	64	0.00	0.23	5,000
	BINGO	1x50	25	0.13	0.48	5,000
	FAST	1x20	500	0.42	2.55	2,000
interferometer	CHIME 4, 100 m cyl.	1280x1	20	0.77	2.55	<u>25,000</u>
	Tianlai 8, 120 m cyl.	2048x1	15	0.00	2.55	<u>25,000</u>
	HIRAX	1024x1	5	0.77	2.55	15,000
interf. + autocor.	SKA1-MID	190x1	15	0.00	3.06	25,000
	SKA1-SUR	96x36	15	0.23	1.38	25,000

from Bull et al. ApJ 803 (2015)



Bull et al. (2015) - ApJ 803
arXiv:1405.1452

Contraintes sur l'énergie noire par un relevé de type CHIME ou Tianlai-full

SKA

- ❖ **Galaxy evolution, Cosmology and Dark Energy**
- ❖ Strong-field tests of gravity using pulsars and black holes
- ❖ Origin and evolution of cosmic magnetism
- ❖ Probing the dark ages
- ❖ Cradle of life

SKA Phase 1:

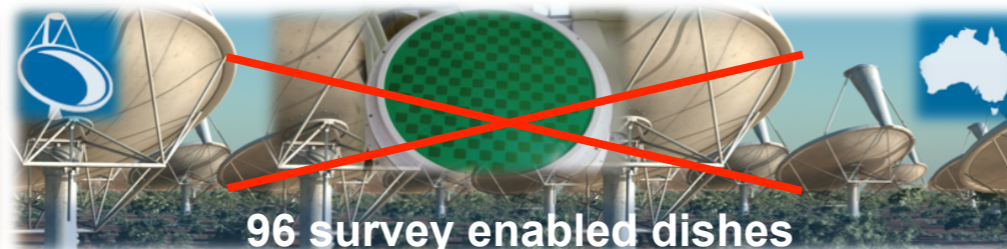
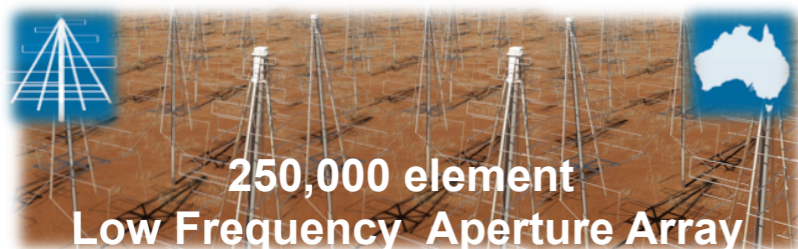
- ❖ SKA-Low (50-350 MHz) - 250 000 antennes, coeur de $D \sim 1 \text{ km}$ et $d_{\text{max}} \sim 45 \text{ km}$
- ❖ SKA-mid (350-3000 MHz) - une centaine de réflecteurs de $D \sim 13-15 \text{ m}$
- ❖ début de construction: 2018



Exploring the Universe with the world's largest radio telescope

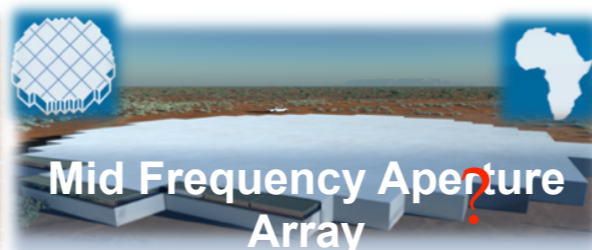
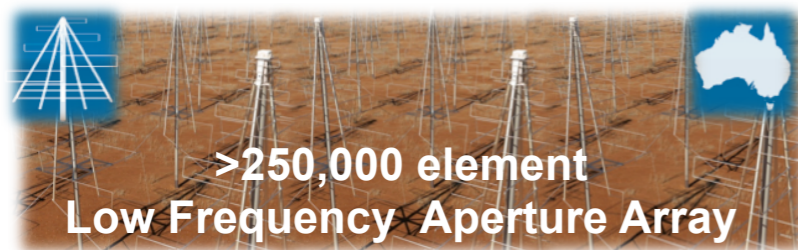


Phase I : 2020

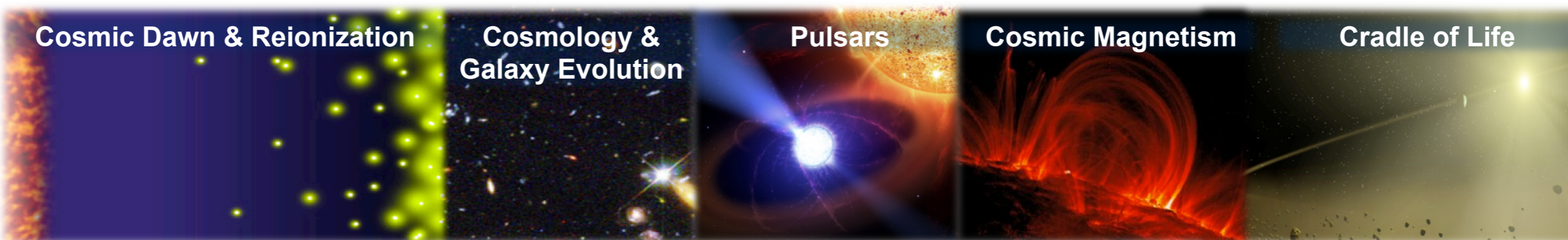


Slide by R. Braun
SKA Science director

Phase II : 2024



Science



50 MHz

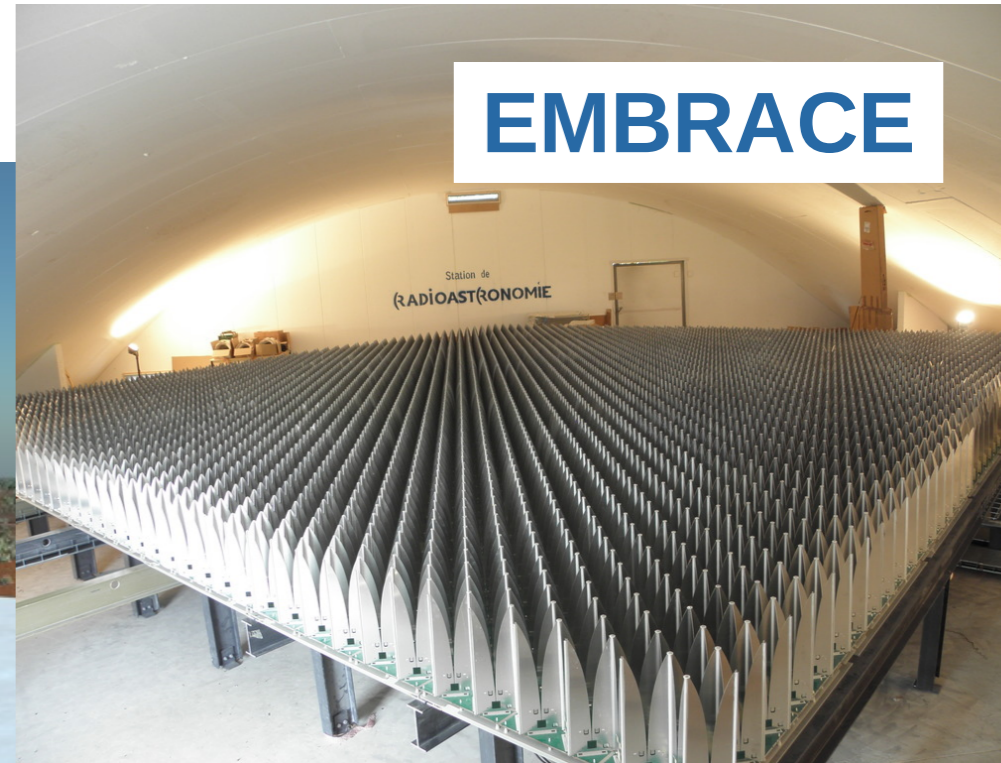
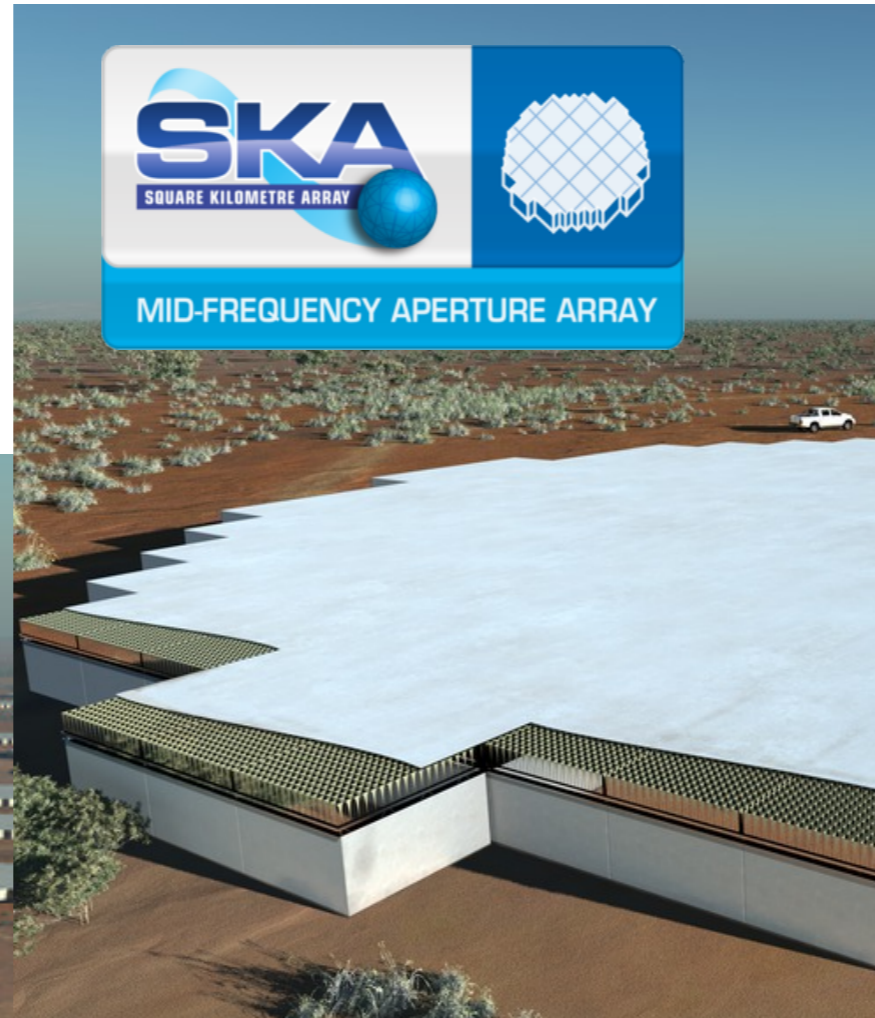
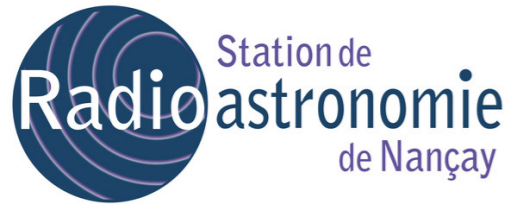
100 MHz

1 GHz

10 GHz

EMBRACE Pathfinder for SKA

Steve Torchinsky



Aperture Array

S. Torchinsky (Nançay)

- * Perspectives scientifiques prometteuses (DE, distribution de masses HI et son evolution à $z \sim 1-2$, caractérisation fine des avant-plans, *pulsars* ...) pour les relevés 21 cm à $z \sim 1-2$
- * Reionisation à plus haut redshift (LOFAR, SKA-Low, HERA)
- * 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 (corrélateur / beam-former) calibration, réduction des données, Reconstruction des cartes 3D map, soustraction des avant-plans ...
- * **Demandes à l'IN2P3 : soutien aux projets - en particulier des missions (Chine, Afrique du Sud) - Calcul/Stockage - Éventuellement (dans ± 2 ans) une contribution (future) à Tianlai / HIRAX (électronique) ...**

The End
