

BAORadio

La cosmologie à 21 cm

CPPM - Marseille

R. Ansari

Mai 2010

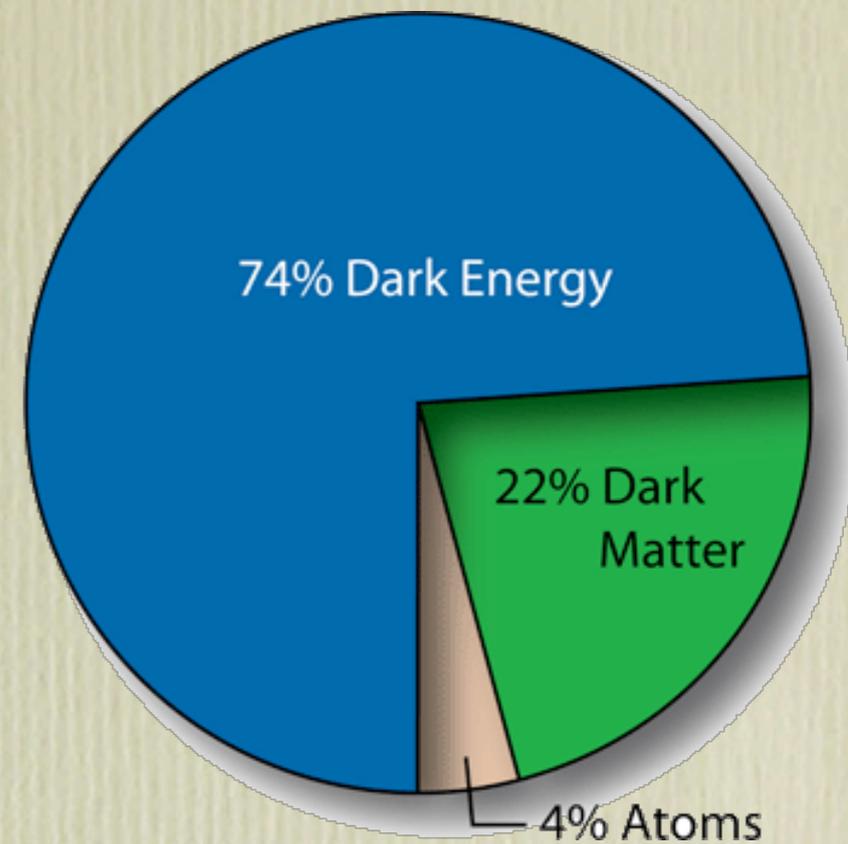
- Les Oscillations Acoustiques Baryoniques et l'énergie noire

- La cosmologie à 21 cm
 - Observation des galaxies
 - Cartographie 3D de l'émission H₂₁
 - Sensibilité à la mesure de $P(k)$

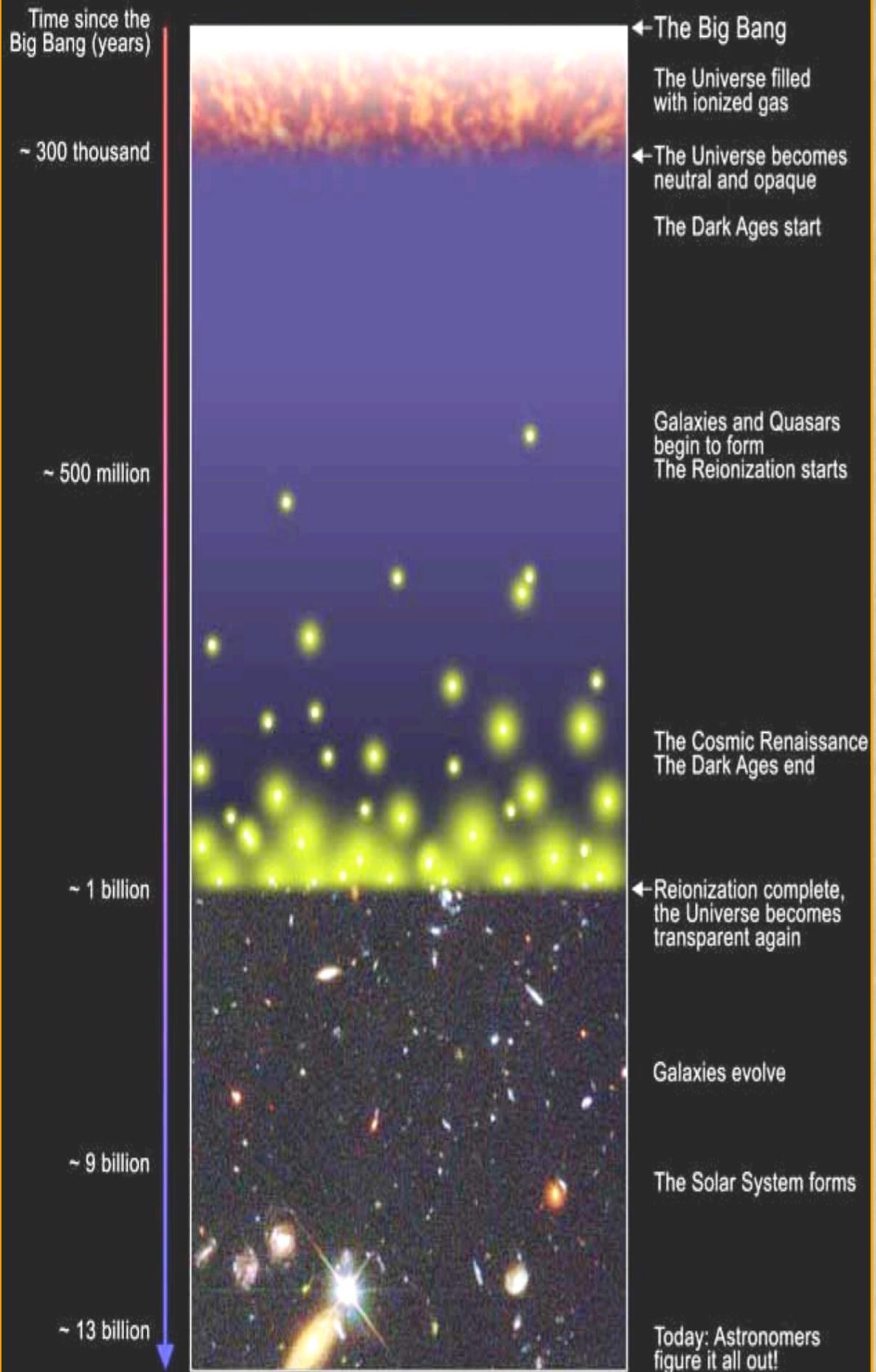
- Projet BAORadio
 - Développement de la chaîne électronique
 - Tests à Nançay et à Pittsburgh
 - Contours et étapes pour un projet de relevé HI cosmologique

L' énergie noire (ou Λ)

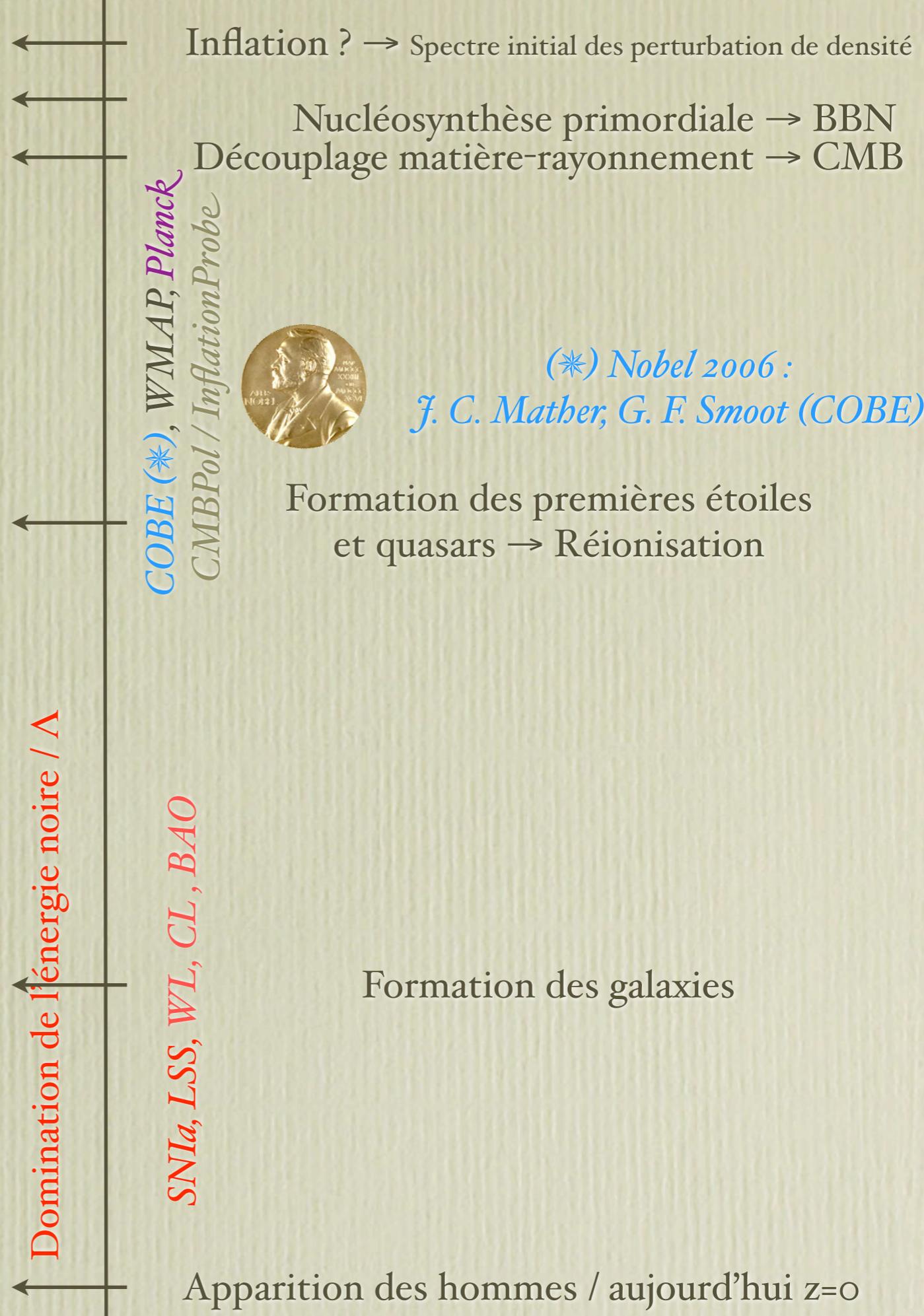
- Les observations récentes sont compatibles avec un univers plat
- La densité d'énergie dans l'univers semble être dominée aujourd'hui par une composante qui se comporte comme la constante cosmologique.
- Λ : Gravité répulsive !
- Énergie du vide (fluctuations quantiques) \implies l'énergie noire ?
- Détermination de l'équation d'état: $p = w(z) \rho$
- $w(z) = -1$ pour la constante cosmologique (Λ)



A Schematic Outline of the Cosmic History

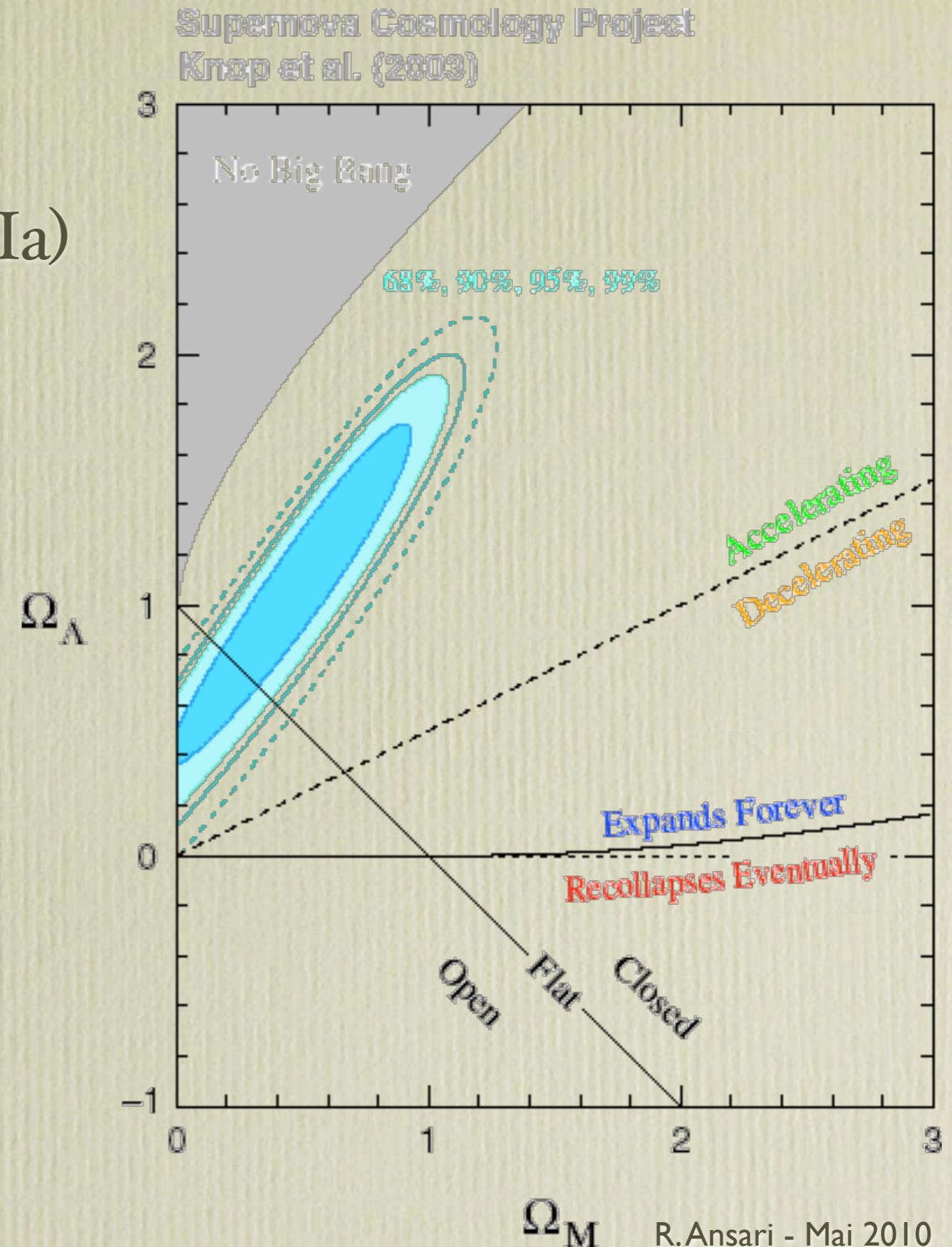


S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech



Accélération de l'expansion et l'énergie noire

- SCP 1998 / High-z 1998 (SNIa)
- Boomerang ,Archeops 2002 (CMB)
- WMAP 2003... (CMB)
- SDSS 2003 (LSS)
- SDSS 2005... (BAO) , 2dF
- SNLS 2005 ... (SNIa)

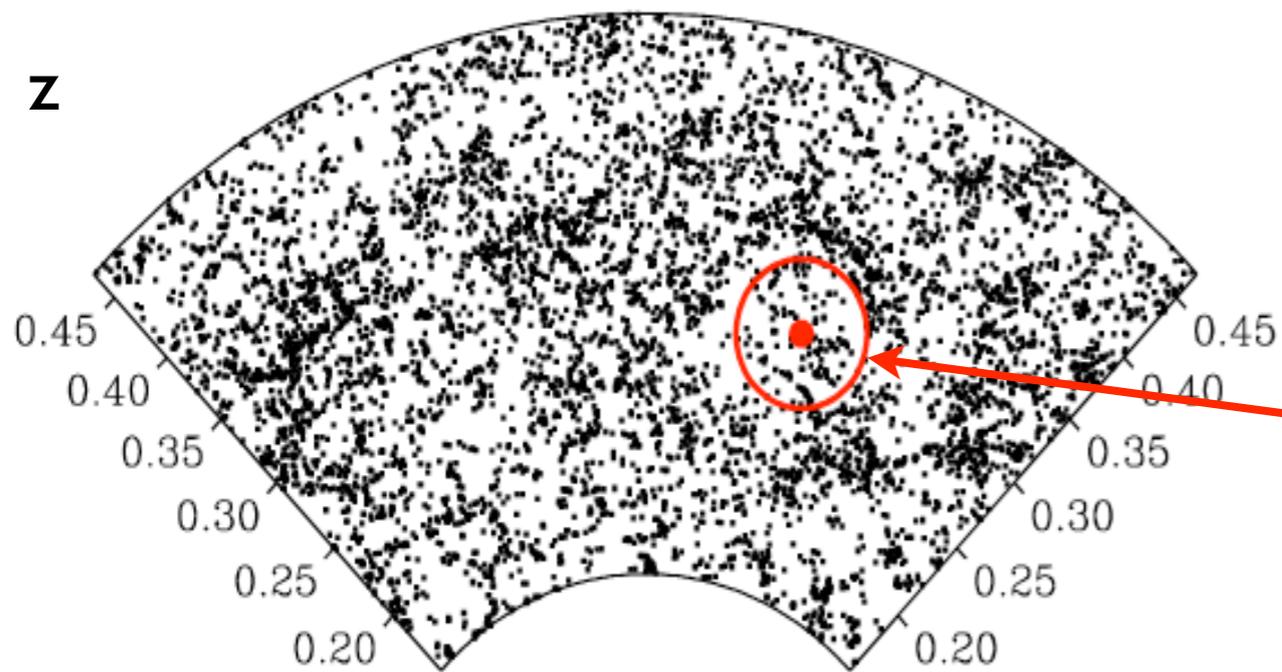
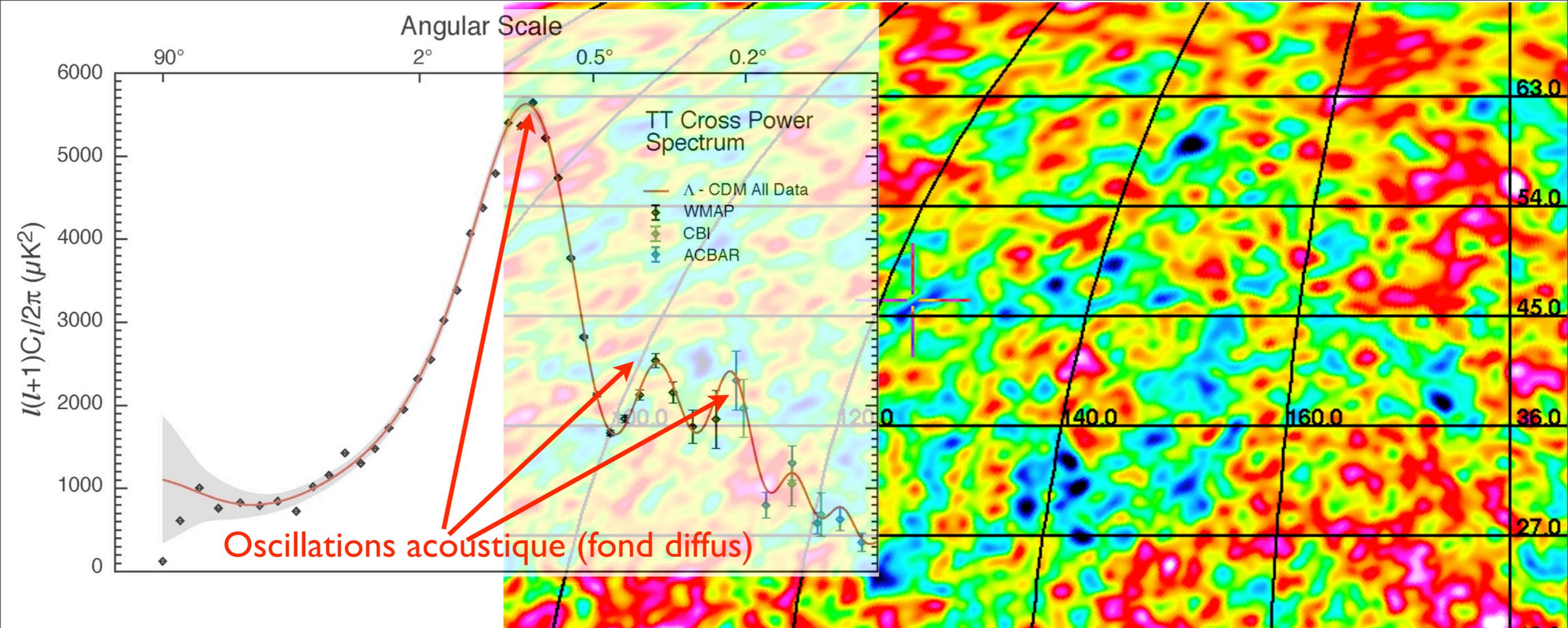


Sondes cosmologiques et l'énergie noire

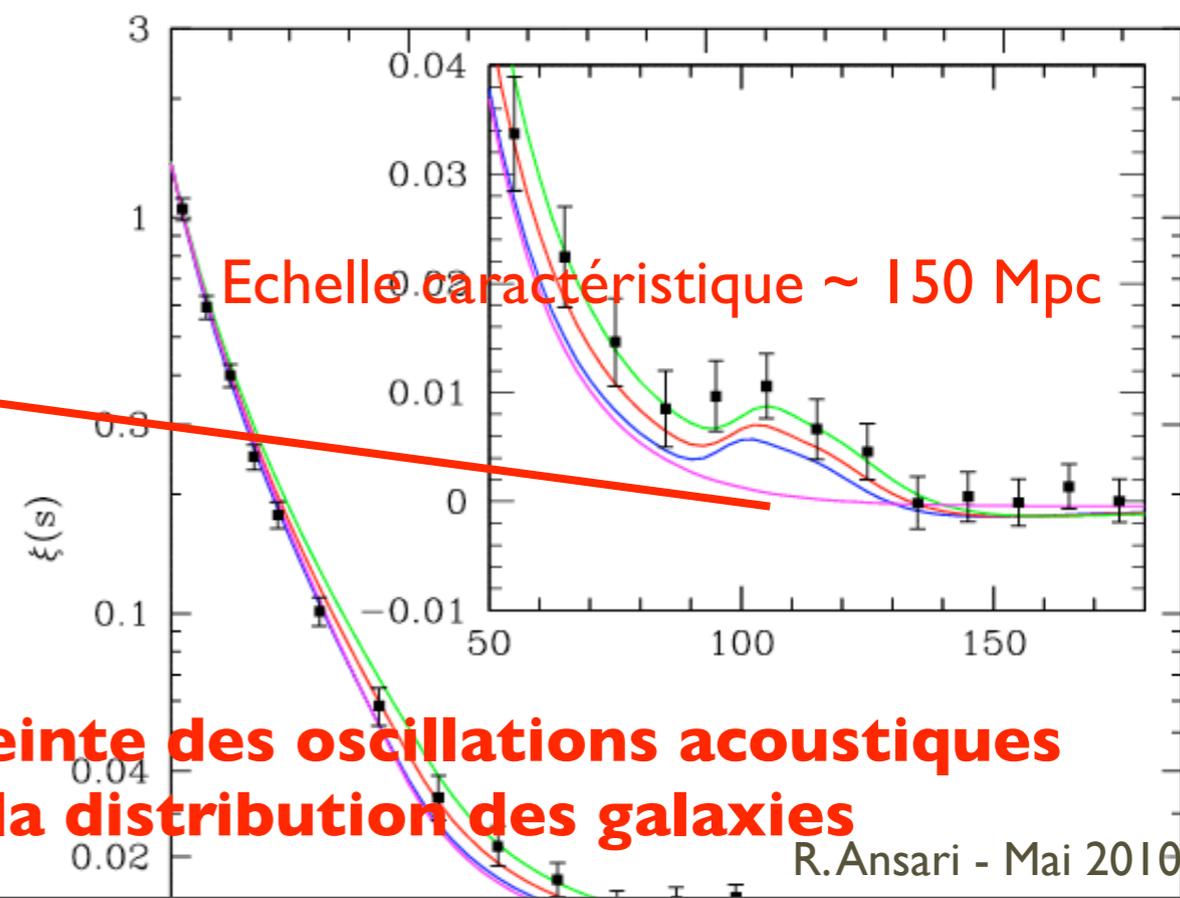
- Les supernovae (**SN**) : mesure la luminosité apparente des SNIa en fonction de $z \rightarrow d_L(z)$
- Oscillations Acoustiques Baryoniques (**BAO**) : Mesure d'échelles caractéristiques dans la distribution des galaxies $\rightarrow d_A(z), H(z)$
- Les distorsions gravitationnelles (**WL**) : mesure de l'orientation préférentielle des galaxies $\rightarrow d_A(z)$, croissance des inhomogénéités (structure / LSS)
- Amas de galaxies (**CL**) : comptage et distribution des amas $\rightarrow d_A(z), H(z)$, formation des structures (LSS)
- Effet Sachs-Wolf Intégré (**ISW**) : évolution du potentiel gravitationnel dans les grandes structures

BAO : Oscillations Acoustiques Baryoniques

- Empreintes laissées par les oscillations du fluide baryons-photons dans la distribution de la matière ordinaire (lumineuse) au cours de la formation des structures
- Modulation de la distribution de matière baryonique, qui suit essentiellement la matière sombre, dans des structures formées par croissance des fluctuations de densité et effondrement gravitationnel
- Sonde cosmologique de type règle standard - avec une mesure @ $z \sim 1100$ en prime (anisotropies du fond diffus micro-ondes)

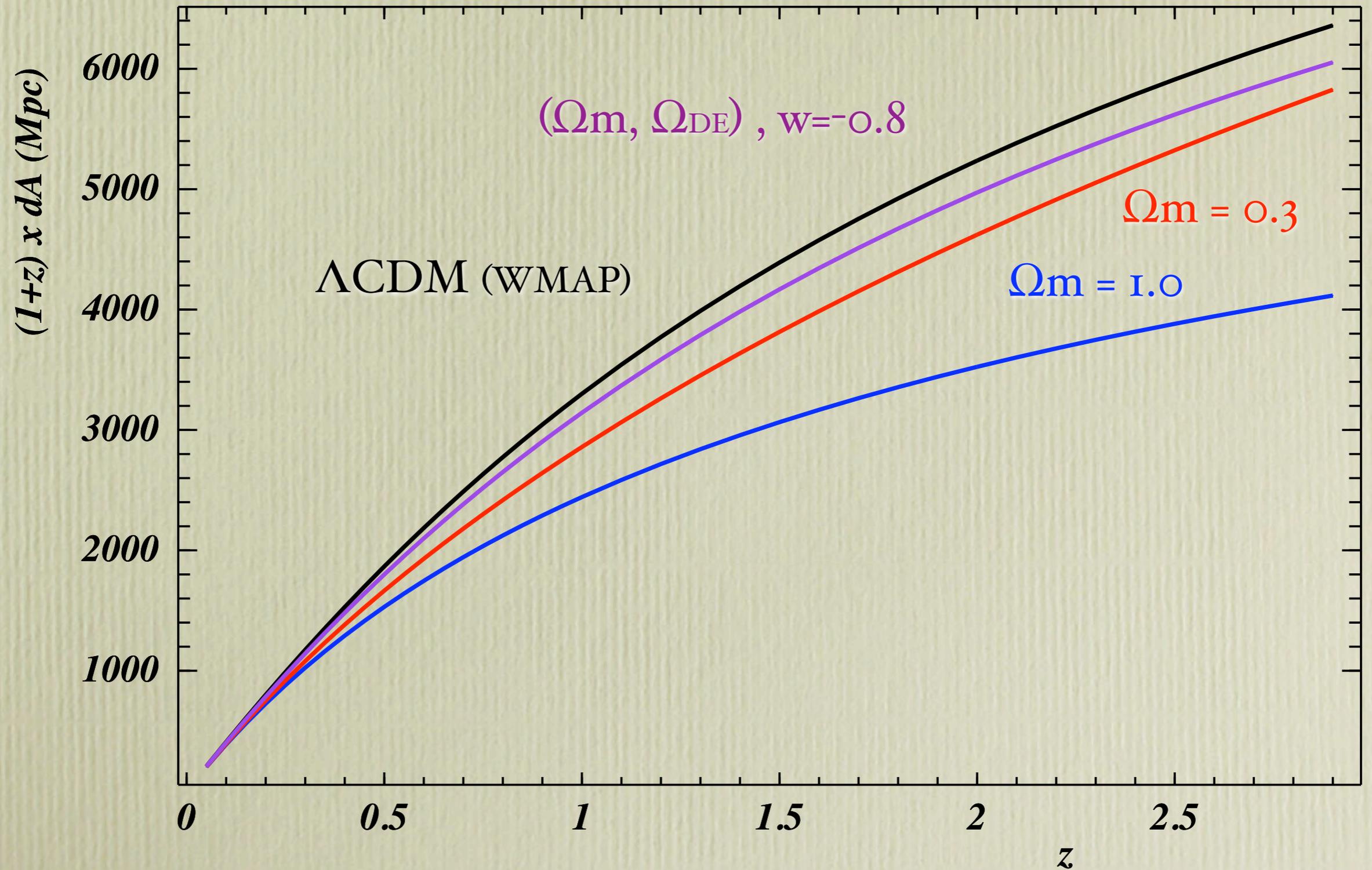


Distribution galaxies
plan (z, angle (α, δ))

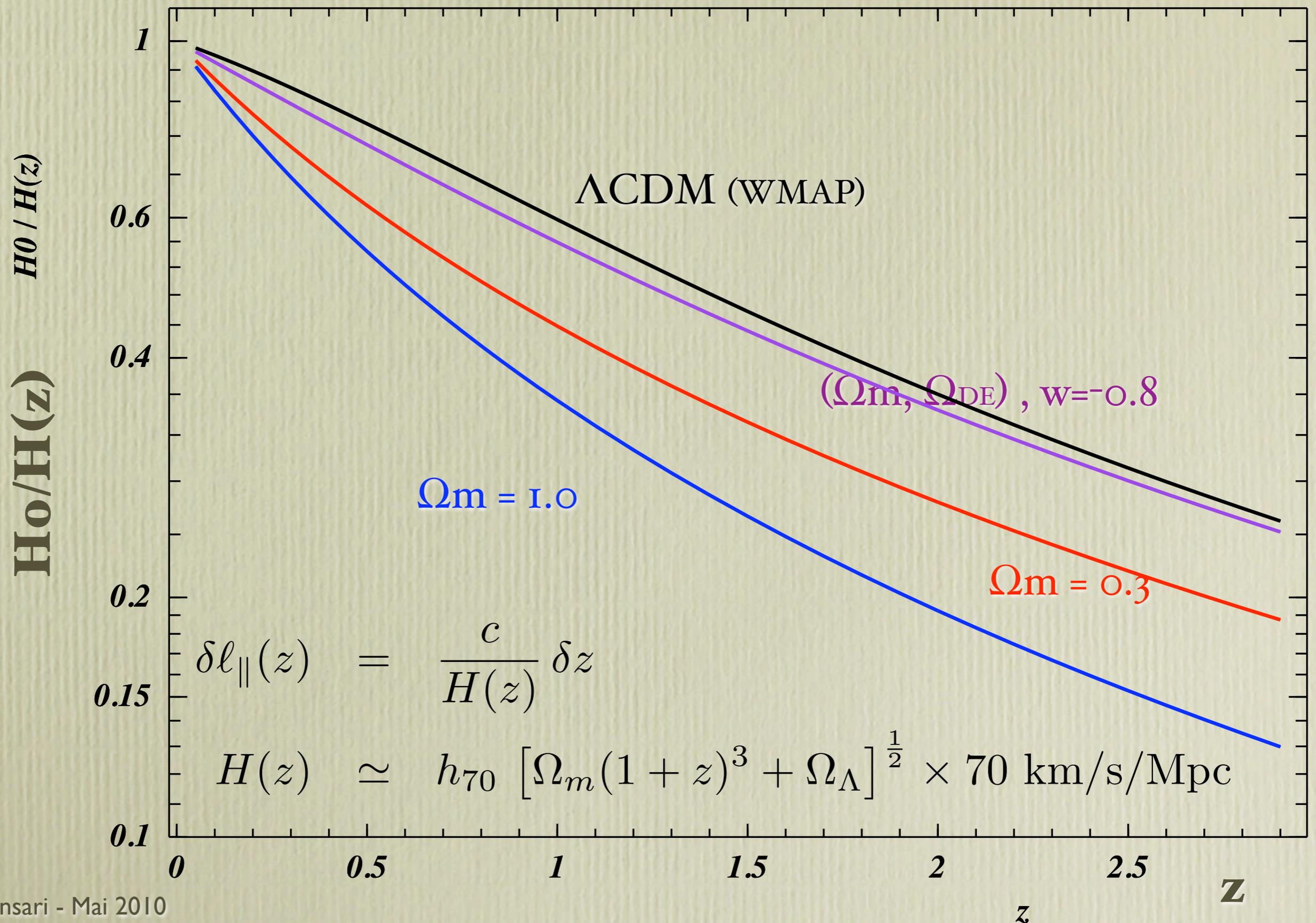


**BAO: Empreinte des oscillations acoustiques
dans la distribution des galaxies**

Distance de diamètre angulaire $d_A(z)$

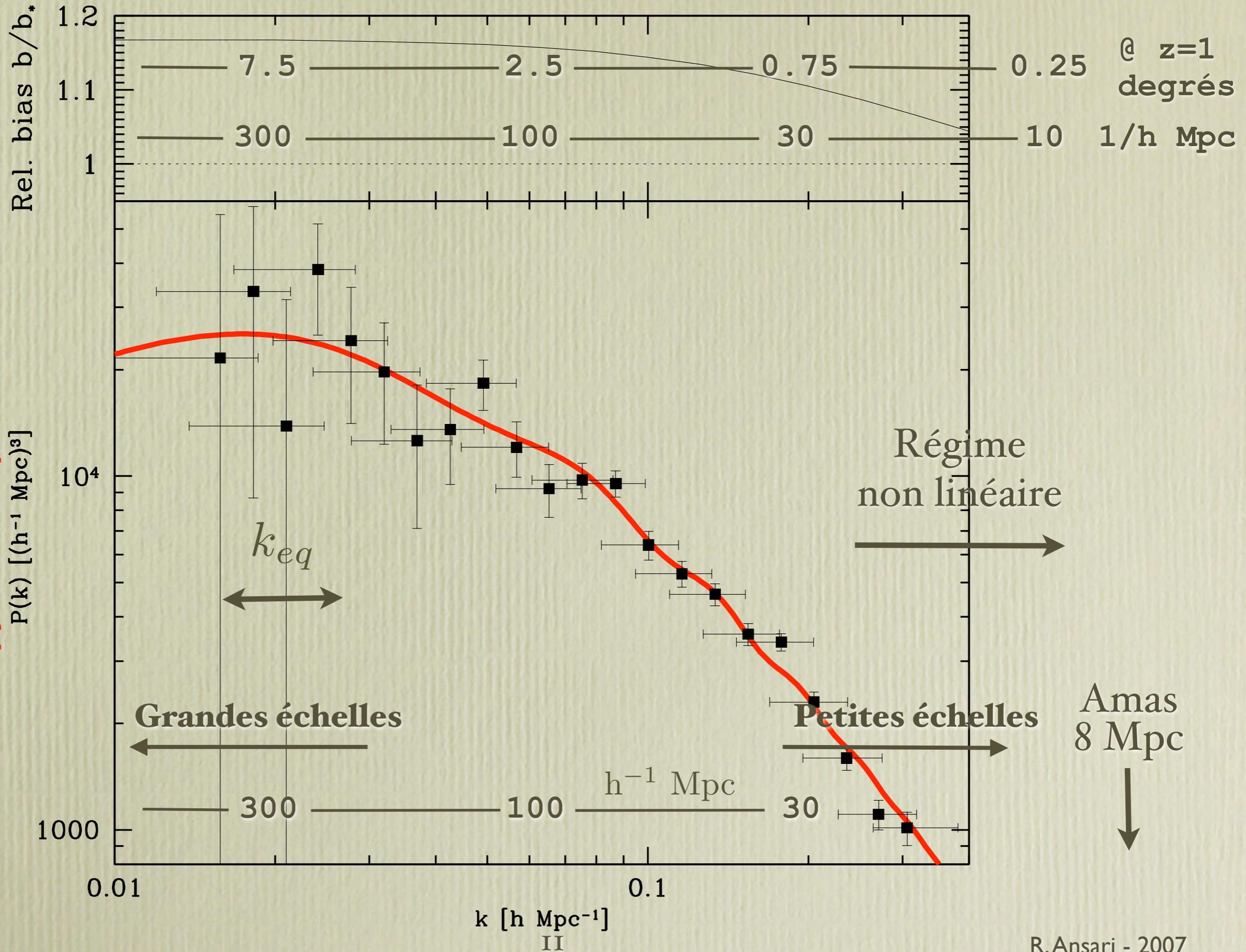


Taux d'expansion $H_0 / H(z)$ (BAO radial/LOS)



SDSS - M. Tegmark et al.

ApJ, astro-ph/03010725



SDSS DR6 -

A.G. Sanchez et al.

MNRAS , astro-ph/0901.2570

SDSS-LRG 75000 LRG's

~ 6000 deg² 0.15 < z < 0.47

SDSS DR6 -

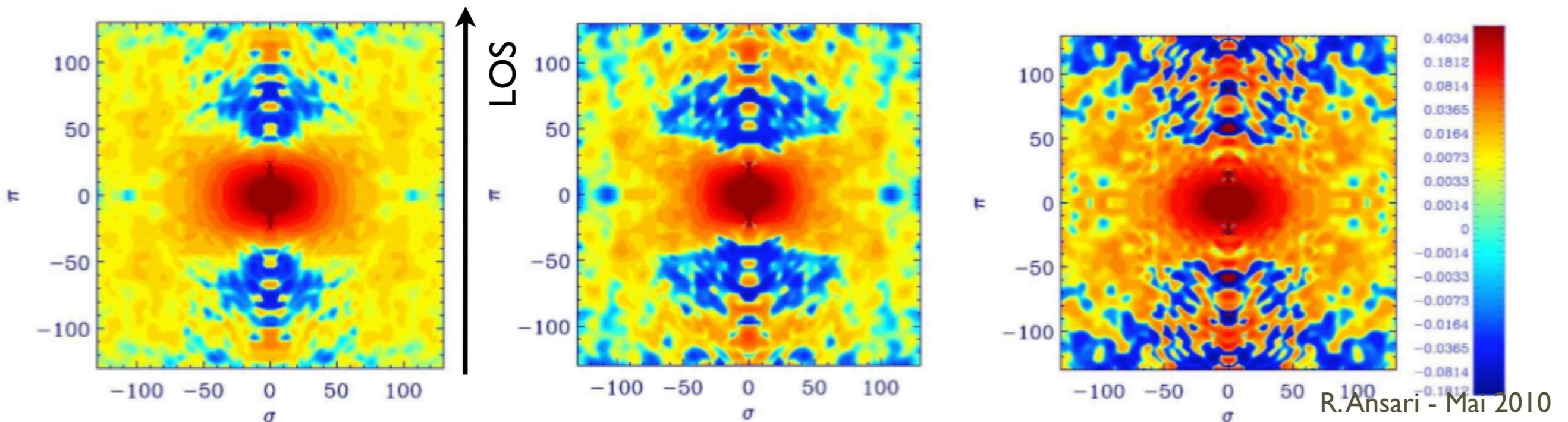
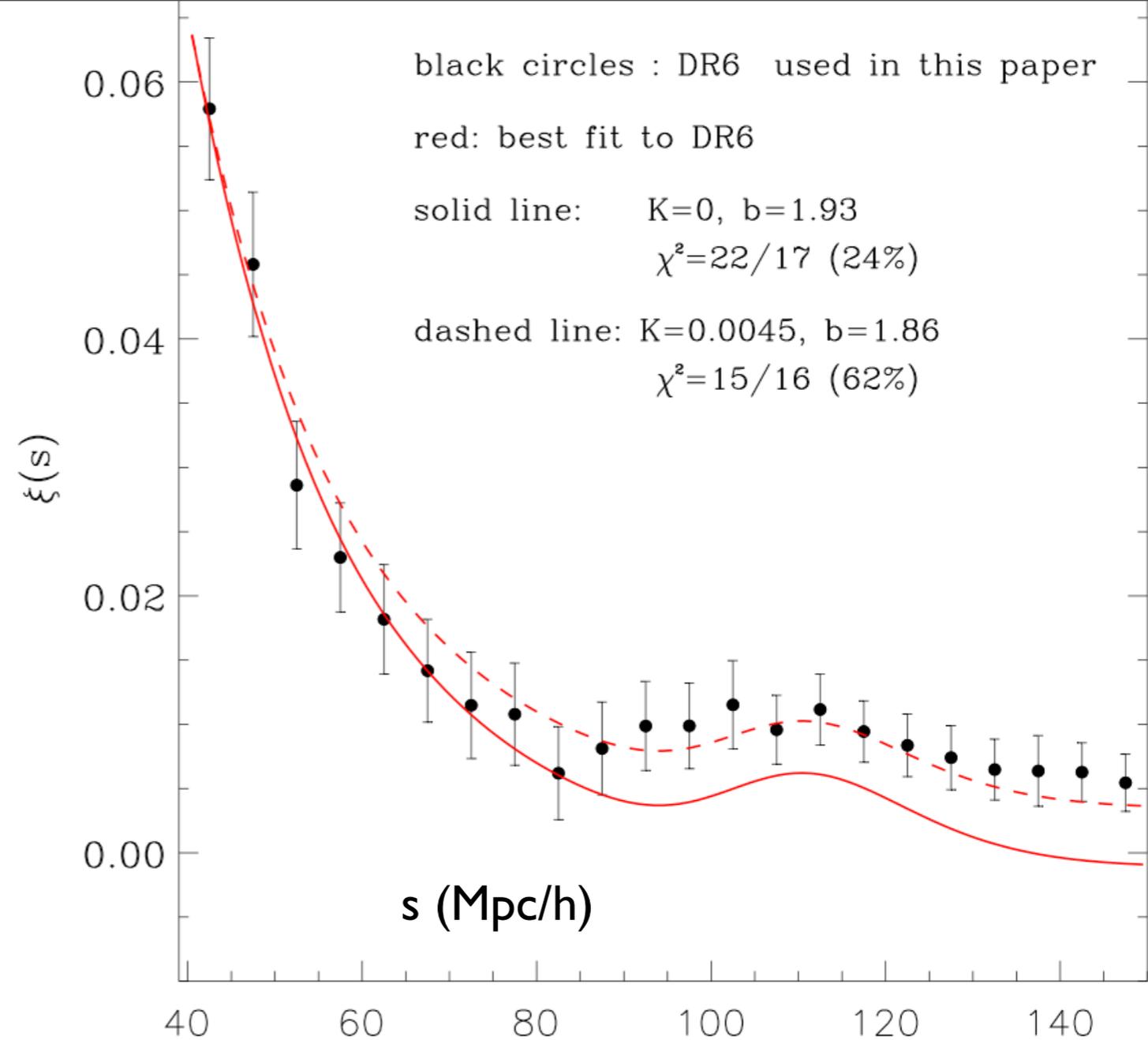
E. Gaztanaga et al.

MNRAS , astro-ph/0807.3551

SDSS-LRG 75000 LRG's

~ 6000 deg² 0.15 < z < 0.47

Line of sight / transverse $\xi(\pi, \sigma)$



Biais et effets systématiques

- Effets exotiques changeant l'horizon acoustique
- $P(k)$ et le régime non linéaire (élargit/déplace le pic de corrélation)
- Biais : traceurs (galaxies) / matière noire, effets d'évolution astrophysique des galaxies ...
- Distorsion dans l'espace des redshifts
- Biais de sélection
- Géométrie du relevé,
- Autres biais/erreurs induits par les observations (photo-z ...)
- Avant-plans en radio

Incertitudes statistiques sur l'estimation de $P(k)$

- L'incertitude intrinsèque, donnée par le nombre de modes observées ou mesurés (variance cosmique)
- Shot noise (bruit de grenaille) dû à l'échantillonnage de Poisson du champ de densité par les objets traceurs (galaxies)

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{4\pi^2}{k^2 \delta k V_{\text{surv}}} [P_{\text{LSS}} + P_{\text{noise}}]}$$

$$P_{\text{shot-noise}} = \frac{1}{n_{\text{gal}}} \quad n_{\text{gal}} : \text{Galaxy density}$$

- Bruit en mode imagerie radio (cartographie de l'intensité d'émission H₂I)
- Avant-plans en radio

BAO en radio

📍 A la manière des relevés optiques :

≡ Identification des sources d'émissions HI (21 cm),
détermination de la position angulaire et du décalage vers le
rouge - Détermination de la fonction de corrélation à deux
points ou le spectre $P(k)$ à partir du catalogue des objets
identifiés

📍 A la manière des observations du fond diffus :

≡ Cartographie à trois dimensions de l'émission HI (21 cm)
 $T_{21}(\alpha, \delta, z)$ - Estimation et soustraction des avant-plans,
détermination du spectre $P(k, z)$ sur les données du cube 3D

BAO en radio avec les galaxies ?

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

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

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

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

$A (m^2)$	$T_{sys} (K)$	$S_{lim} (\mu\text{Jy})$
5000	50	66
5000	25	33
100000	50	3.5
100000	25	1.7

z	$S_{21} (\mu\text{Jy})$
0.25	140
0.50	27
1.0	4.8
1.5	1.74
2.0	0.85

Résolution 3-20 arcmin

Sensibilité ~ mJy

Table B.1 Comparison of major blind HI surveys

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

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

$\delta z \sim 0.0001$

Comparaison de quelques relevés à 21 cm

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

BAO avec une cartographie $T_{21}(\alpha, \delta, z)$

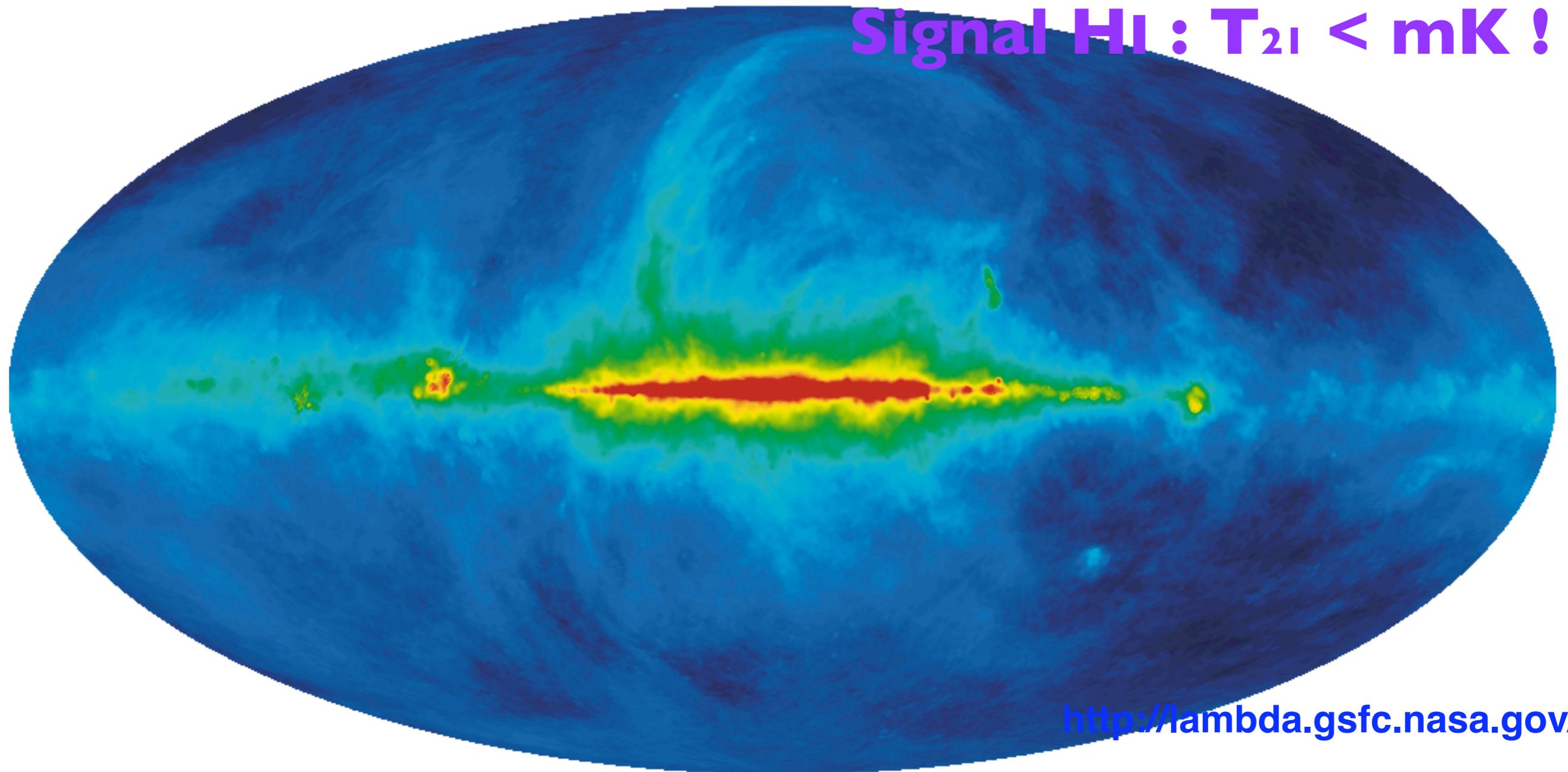
Total Intensity Mapping

- Ne nécessite qu'une résolution angulaire de 10-15 arcmin
- Nécessite un grand champ de vue (FOV) et une large bande
- ≡ Bruit instrumental (T_{sys})
- ≡ Difficulté de soustraction des avant plans et des 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

Les avant plans

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



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

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

Carte Haslam à 408 MHz (émission
Synchrotron de la Galaxie)

H₂₁ P(k) spectrum in temperature (T₂₁) and noise

- $\langle T_{21} \rangle \sim \leq 1 \text{ mK}$, $\sigma_{T_{21}} \leq \text{mK}$
- @ $z \sim 1$, $\nu_0 \approx 700 \text{ MHz}$, $100\text{m} \sim 10 \text{ arcmin}$ resolution
- $T_{\text{sys}} \sim 50 \text{ K}$, $t_{\text{int}} \sim 1 \text{ day}$, $\delta\nu \sim 0.7 \text{ MHz} \rightarrow \sigma_{\text{noise}} \leq \text{mK}$
- $\delta\nu \sim 0.7 \text{ MHz}$, $\delta\nu/\nu \sim \delta z/z \sim 0.001$
- $\Delta z \sim 0.2 \rightarrow \Delta\nu \sim 150 - 200 \text{ MHz}$, $\sim 500 \text{ Mpc}$ in L_z in
- Survey area : $360 \times 30 \text{ deg}^2$ (10000 deg^2), $360 \times 10 \text{ deg} \dots$

BAO - Radio R&D en cours

the David &
Lucile Packard
FOUNDATION

Carnegie Mellon

l'Observatoire
de Paris



IN2P3

INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES



Fermilab



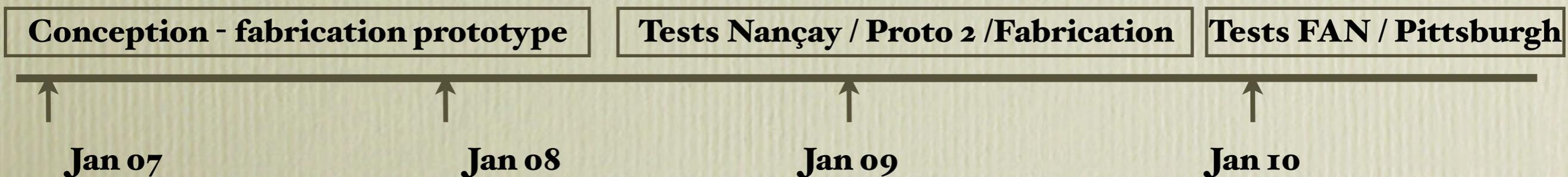
- 
- Collaboration avec l'observatoire Paris-Meudon-Nançay (depuis été 2007)
 - Tests de l'électronique au radiotélescope de Nançay (RTN)
 - programmes d'observations en commun (Amas ...)
 - Prototype FAN
 - Soutien du PNC/PNCG en 2007, 2008, 2009, 2010
 - Financement Prog. P&U et Astroparticules en 2007-2010
 - Soutien IRFU (2007-2010)
 - Financement P2I (LAL+DAPNIA) pour 2008-2010

BAORadio-CRT : Concept de l'instrument

- Cartographie de la distribution de masse HI par mesure d'intensité à 21 cm (Pas de détection de source)
- Instrument de type synthèse-de-lobe/interféromètre à grand champ ($10-100 \text{ deg}^2$)
 - ➔ $\sim 100-1000$ lobes simultanés → Système numérique
- Récepteurs large bande (200-250 MHz) numériques
- Corrélateur/beamformer numérique : flux \sim TO/s
- Antennes (réflecteurs) à bas coût cylindriques fixes ou petites paraboles $D \sim 5$ mètres
- Résolution 5-10 arcmin, Surface $\sim 10\,000 \text{ m}^2$
 - ➔ Antennes réparties sur $\sim 100-200 \text{ m} \times 100-200 \text{ m}$

Prototype CRT-BAORadio

- Construction de deux réflecteurs cylindriques longxlarg $\sim 25\text{m} \times 10\text{m}$
- résolution ~ 1 deg terminée (CMU-Pittsburgh) - 64 cartes x 4 récepteurs (dipôles) / carte = 256 dipôles, 128 / cylindre
- Etude et construction d'un prototype électronique ~ 32 voies (70k€) :
LAL + DAPNIA (filtrage, numérisation @ 500 MHz, FFT, transfert et traitement sur PC)
- Tests auprès du radiotélescope de Nançay
- Tests sur les réflecteurs cylindrique de Pittsburgh
- Equipement du proto FAN
- Faisabilité - validation de la technique reconstruction multilobe par traitement numérique. Evaluation réaliste des coûts

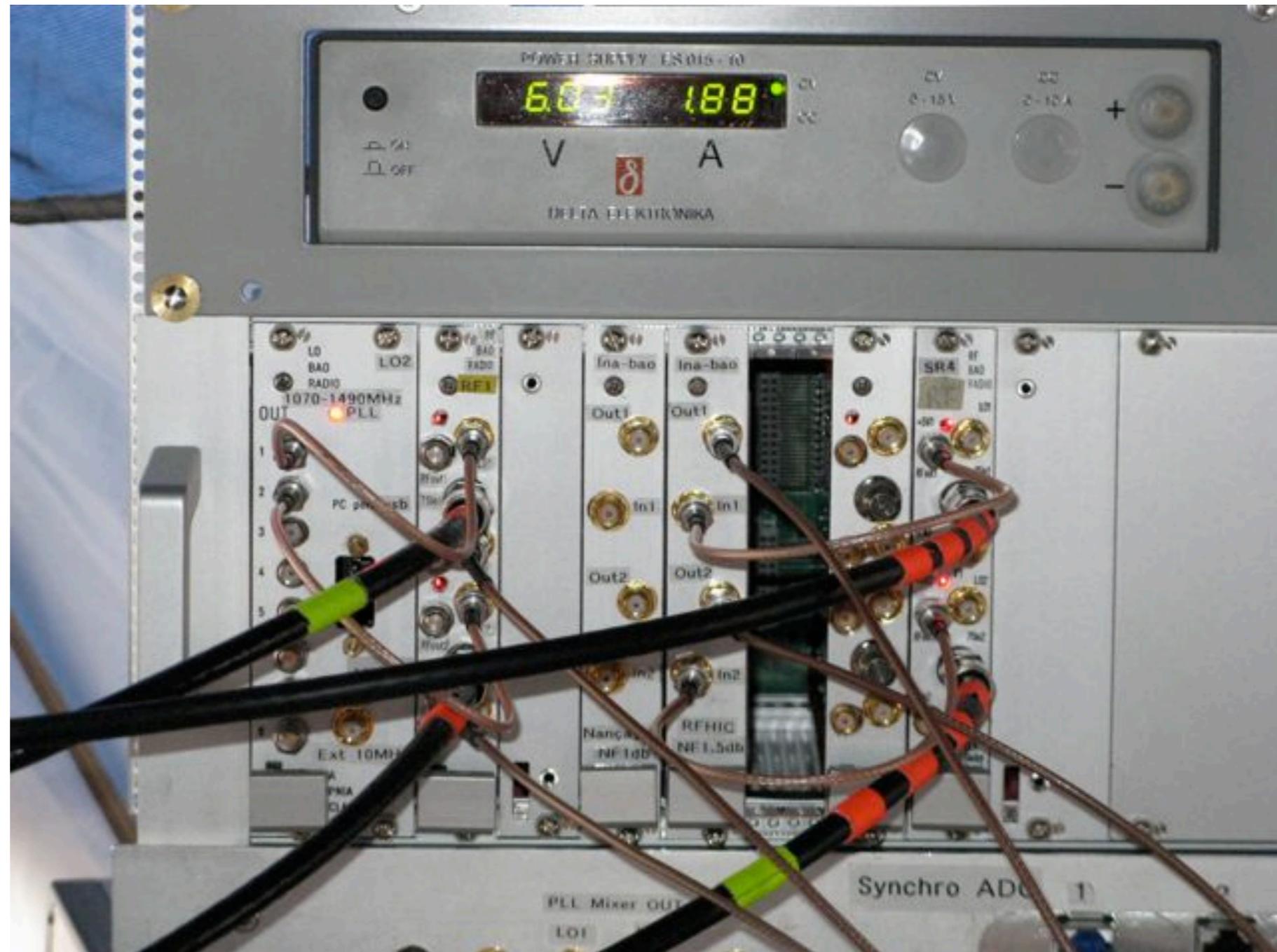


Electronic chain modules

- **AEM** : Analog Electronic Module (Amplification, filtering, frequency shifter) - (*IRFU*)
- **DISCLK** : Clock and trigger distribution system (*IRFU*)
- **DIG/FFT** : Digitizer Frequency Separator (ADC-Board) 4 channel, 500 MHz sampling, with on the fly FFT capability, dual high speed optical data transfer (*LAL, IRFU*)
- **PDREC** : PCI-Express data reception module (*LAL*)
- **ACQS** : Acquisition/control software (*LAL*)
- **BFM** : FPGA / Beam former (*IRFU*)

AEM (Analog Electronic)

- Amplifiers, filters, and mixer using a LO (Local Oscillator)





Synchro ADC

Clock Synchronization Module

DCLK

Memtec
VIRTEX-II PRO
XC2VP20-1000
1000

Random Cable USB
Model: RC-USB
Manufacturer: Memtec
Part Number: MTC-RC-USB
Serial Number: 1000

PLL Mixer OUT
LOT
LOP

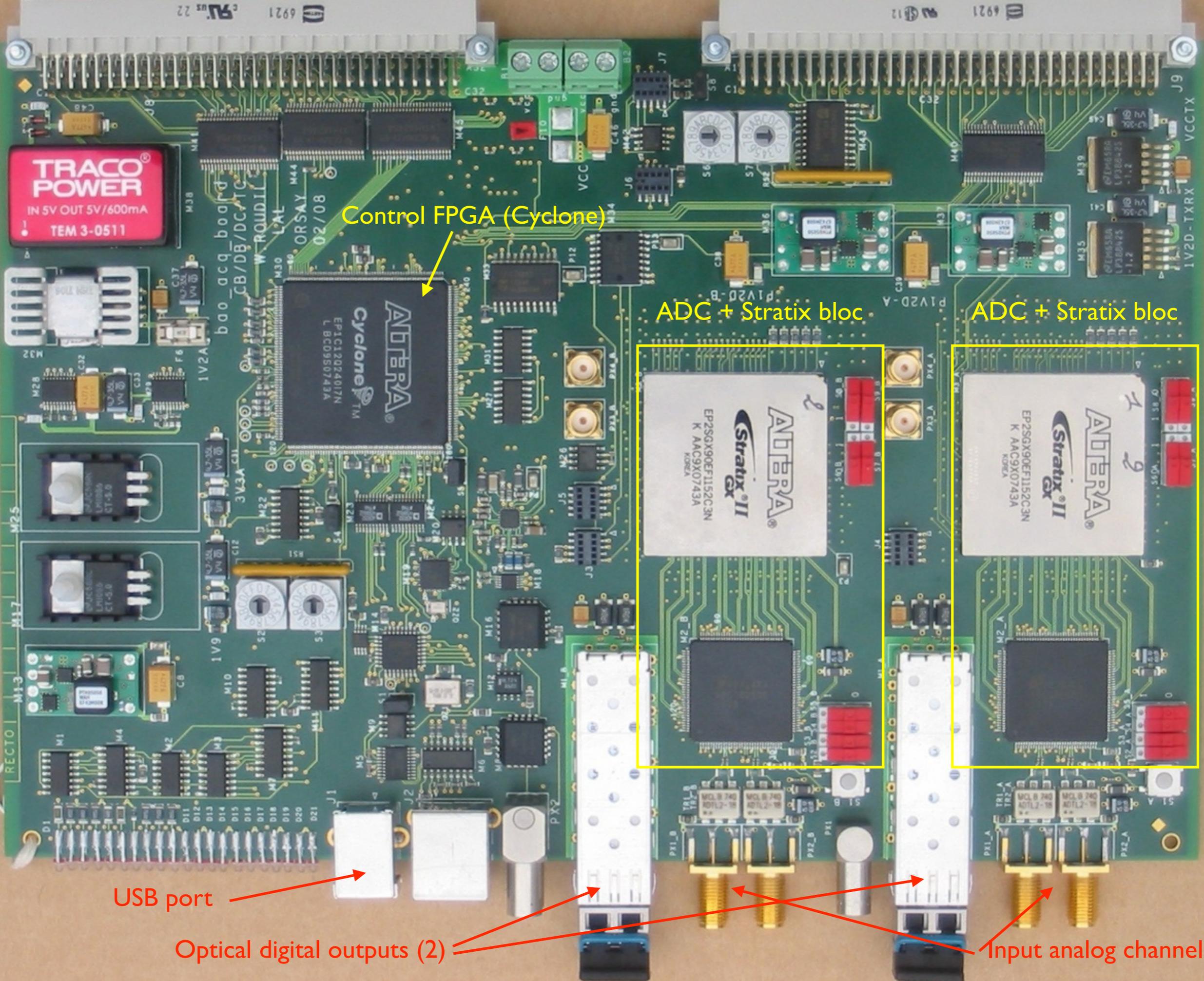
FPGA/JTAG
RST Prog

Master Clock EXT
10MHz
Master Clock INT

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

85514
10/11

Exhibition 02 2000
2000 2001
2001 2002
2002 2003
2003 2004
2004 2005
2005 2006
2006 2007
2007 2008
2008 2009
2009 2010
2010 2011
2011 2012
2012 2013
2013 2014
2014 2015
2015 2016
2016 2017
2017 2018
2018 2019
2019 2020
2020 2021
2021 2022
2022 2023
2023 2024
2024 2025
2025 2026
2026 2027
2027 2028
2028 2029
2029 2030
2030 2031
2031 2032
2032 2033
2033 2034
2034 2035
2035 2036
2036 2037
2037 2038
2038 2039
2039 2040
2040 2041
2041 2042
2042 2043
2043 2044
2044 2045
2045 2046
2046 2047
2047 2048
2048 2049
2049 2050
2050 2051
2051 2052
2052 2053
2053 2054
2054 2055
2055 2056
2056 2057
2057 2058
2058 2059
2059 2060
2060 2061
2061 2062
2062 2063
2063 2064
2064 2065
2065 2066
2066 2067
2067 2068
2068 2069
2069 2070
2070 2071
2071 2072
2072 2073
2073 2074
2074 2075
2075 2076
2076 2077
2077 2078
2078 2079
2079 2080
2080 2081
2081 2082
2082 2083
2083 2084
2084 2085
2085 2086
2086 2087
2087 2088
2088 2089
2089 2090
2090 2091
2091 2092
2092 2093
2093 2094
2094 2095
2095 2096
2096 2097
2097 2098
2098 2099
2099 2100



TRACO POWER
IN 5V OUT 5V/600mA
TEM 3-0511

Control FPGA (Cyclone)

ADC + Stratix bloc

ADC + Stratix bloc

USB port

Optical digital outputs (2)

Input analog channels (4)

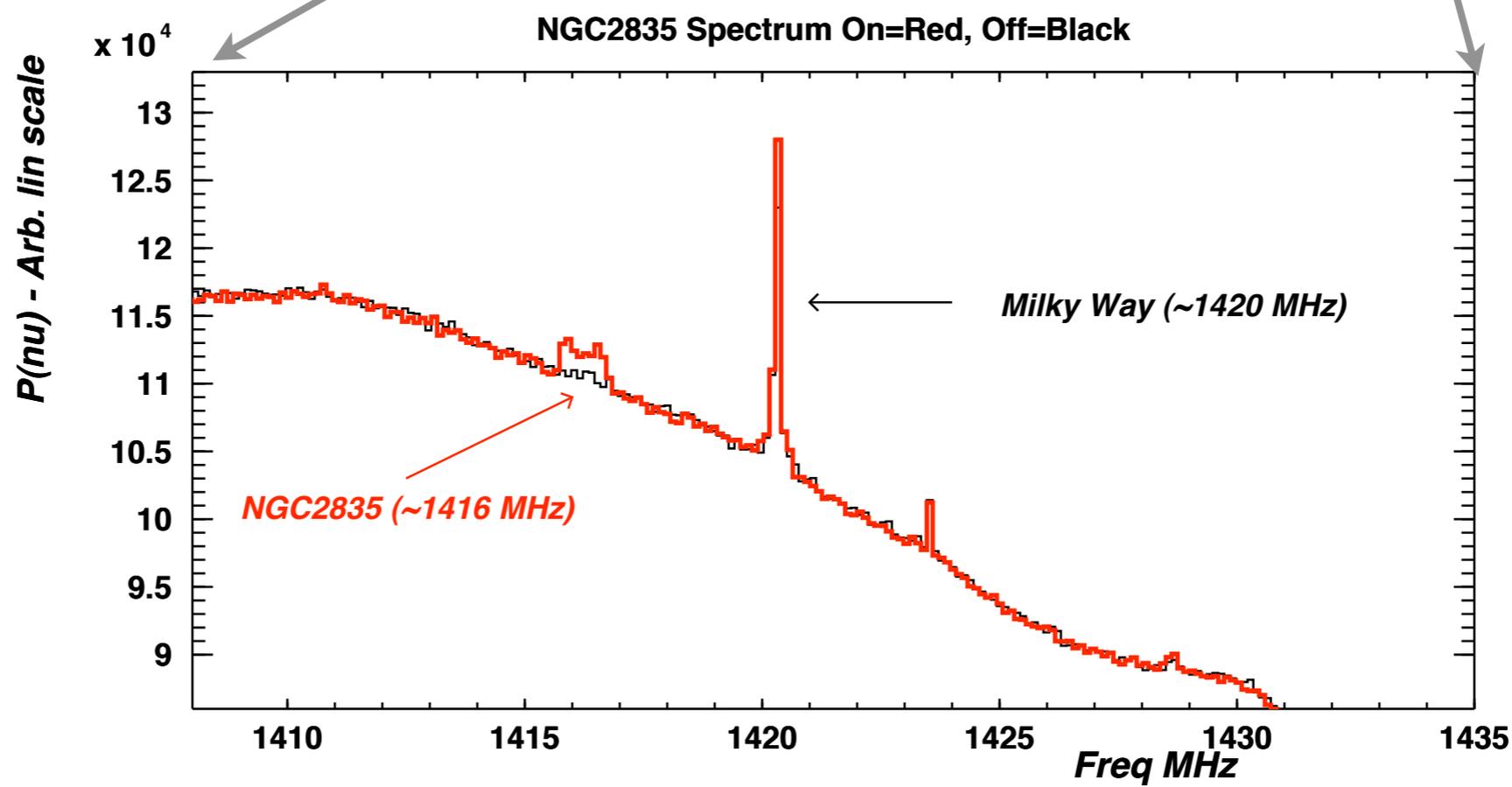
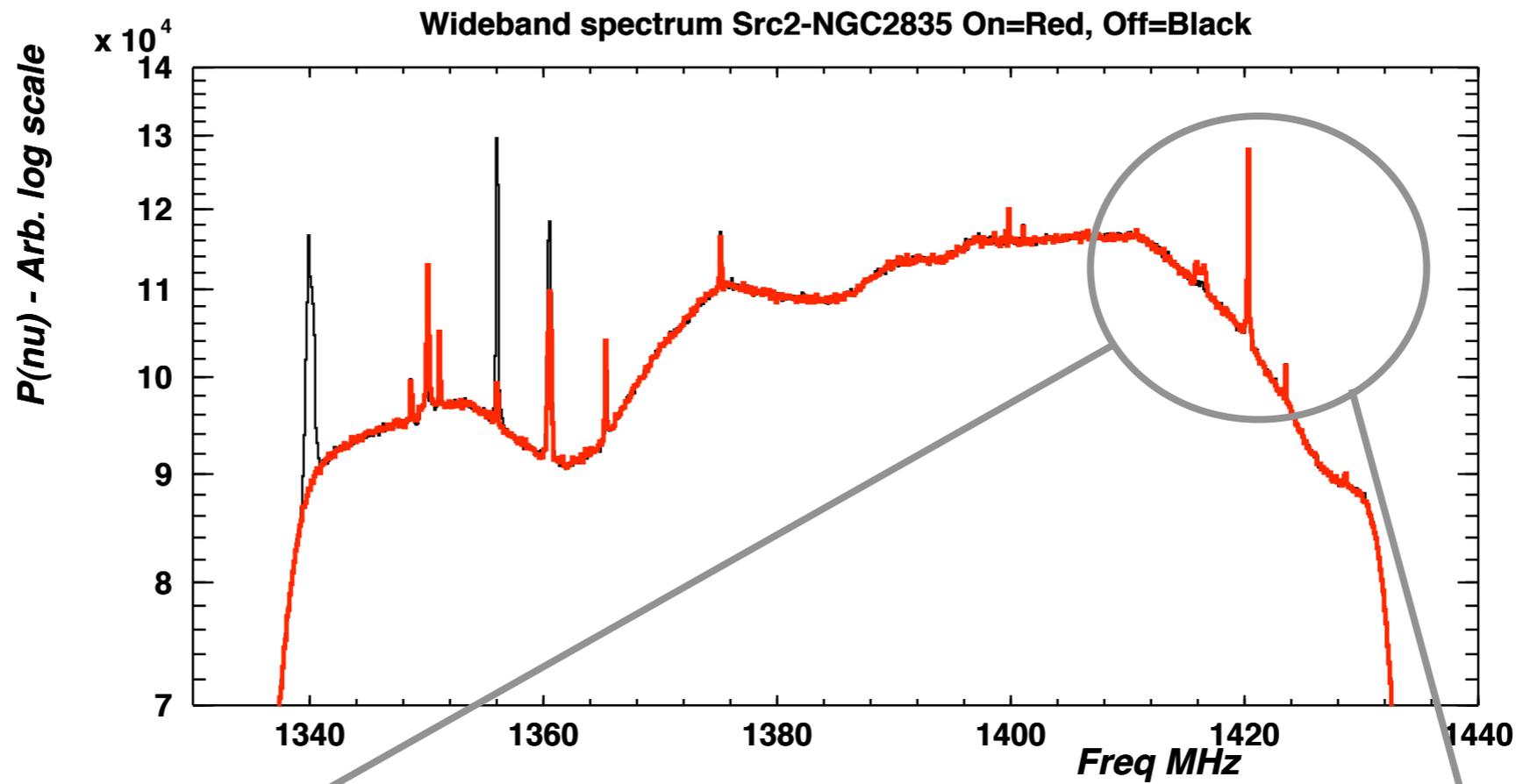
ALTERA
Cyclone™
EP1C12024017N
L BC09S0743A

ALTERA
Stratix™ II
EP2SGX900EF1152C3N
K AAC9X0743A
KOREA

ALTERA
Stratix™ II
EP2SGX900EF1152C3N
K AAC9X0743A
KOREA

- Juillet 2008 : premiers tests à Nançay
- Juin 2009: premiers tests en mode interférométrique à Pittsburgh
- Novembre 2009: Observations avec 16 voies à Pittsburgh - FFT au vol sur FPGA
- Janvier 2010: Réception de la mini série des 7 cartes DIG-FFT au LAL (total 12 cartes, 48 voies)
- Printemps 2010: Tests sur le prototype FAN à Nançay
- Printemps/Automne 2010: Observations à Pittsburgh avec 32 voies, test du prototype de corrélateur/beamformer
- Été/Automne 2009: Prog. d'observation d'amas proche ($z \leq 0.12$) en HI avec l'électronique BAORadio à Nançay
- Début 2011: Mini interféromètre de test avec 8 paraboles de 3.5 mètres à Nançay

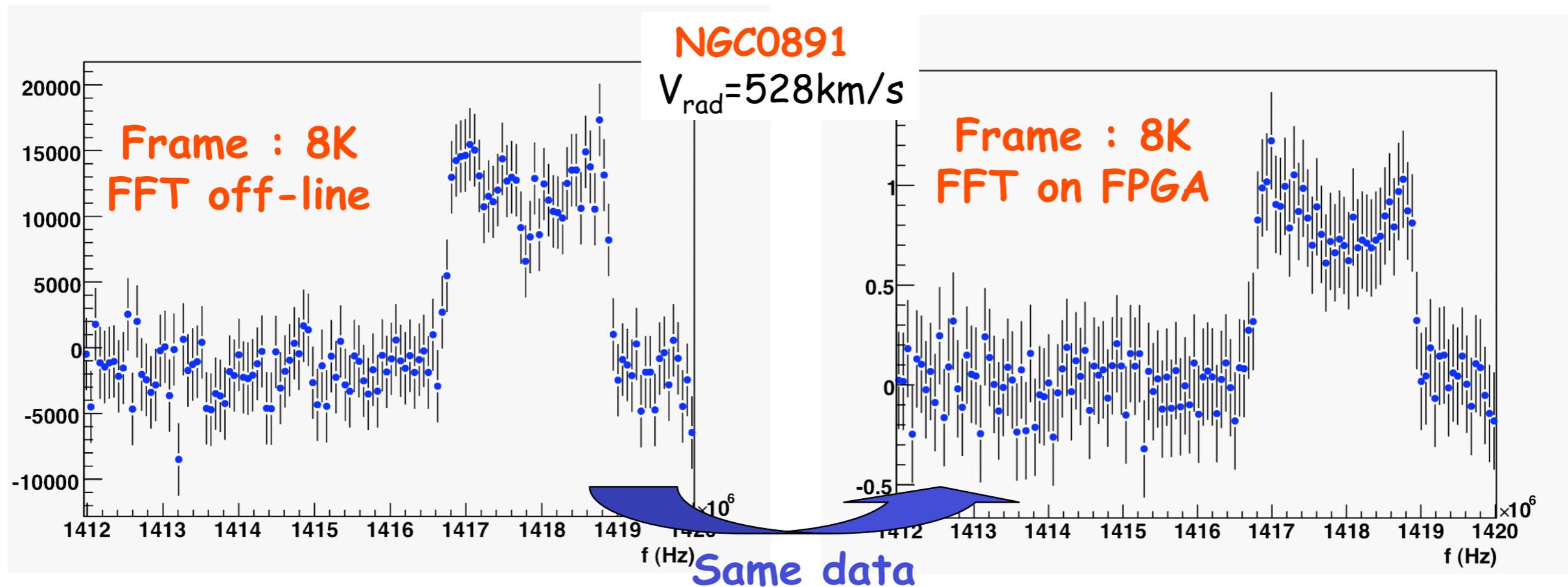
Tests at Nançay - July 2008





Avril 2009 - Nançay

On-the-Fly FFT on FPGA



Tests of the FFT:

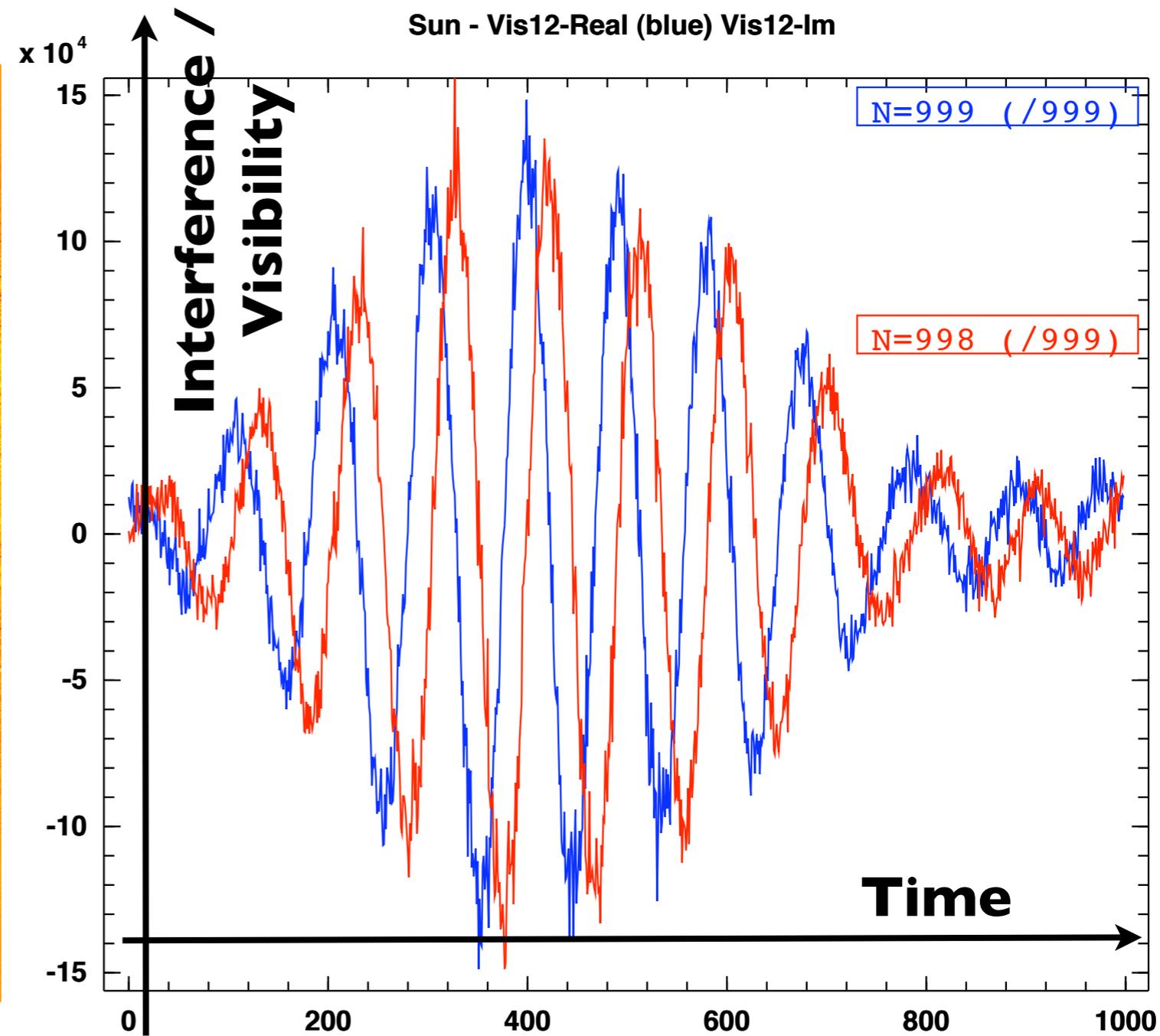
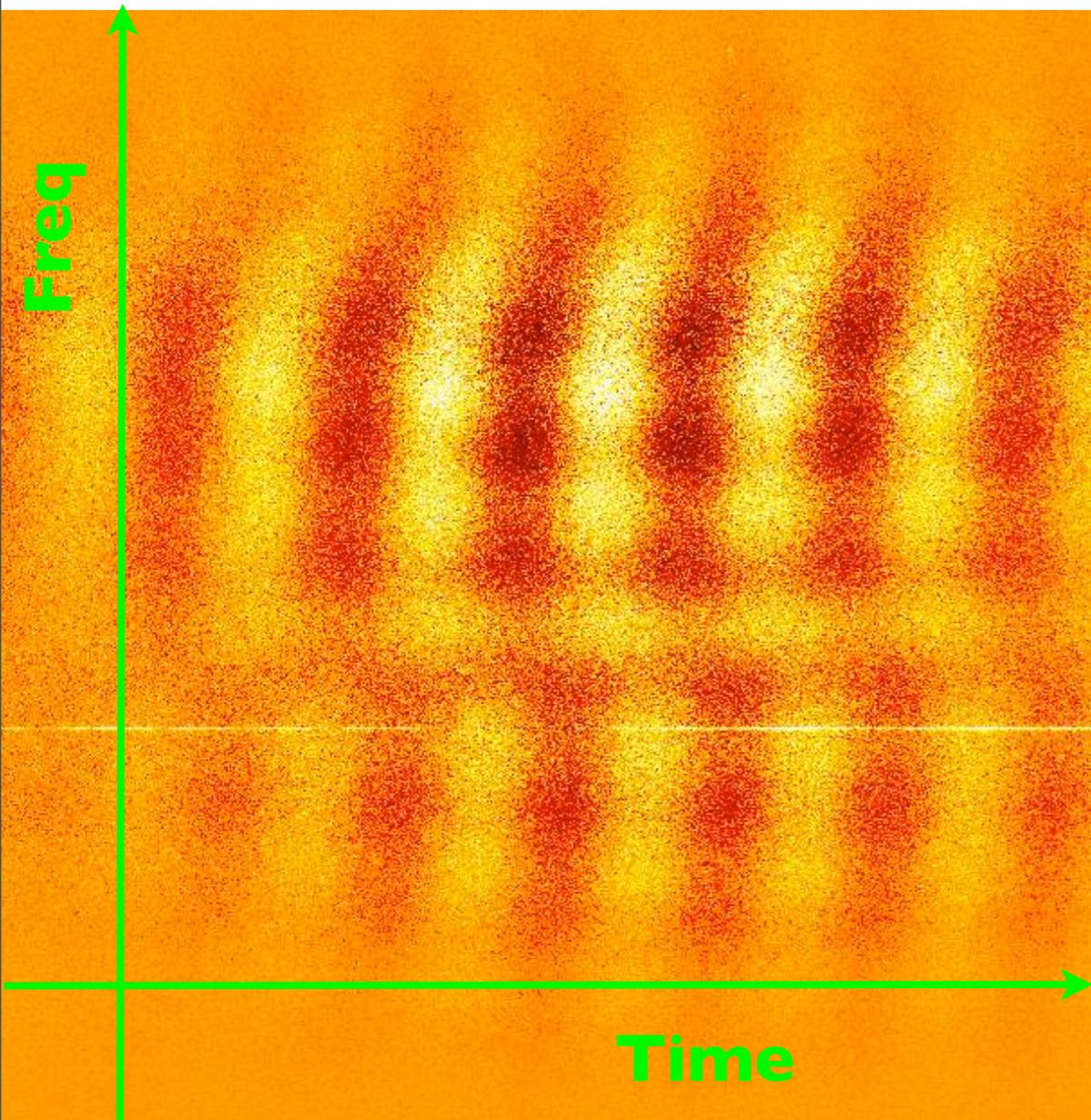
- 2 channels (raw data) 2 channels (on-the-fly FFT)
- Frame : 8k samples per channel
- Resolution: (60kHz)
- Comparison for the same data (FFT off-line - FFT on FPGA)
- **Preliminary results very promising!!!**





Pittsburgh, Juin 2009

Tests à Pittsburgh, Juin 2009



Pittsburgh - Novembre 2009

- Observations en mode interférométrique sur les deux réflecteurs cylindrique de Pittsburgh
- 16 voies de numérisation et décomposition spectrale (FFT) sur FPGA
- Observation des sources radio Cygnus-A, Cass-A et du soleil
- > 1 TO de données en 2-3 heures d'observation
- Programme d'analyse des données et / calibration (C. Magneville)

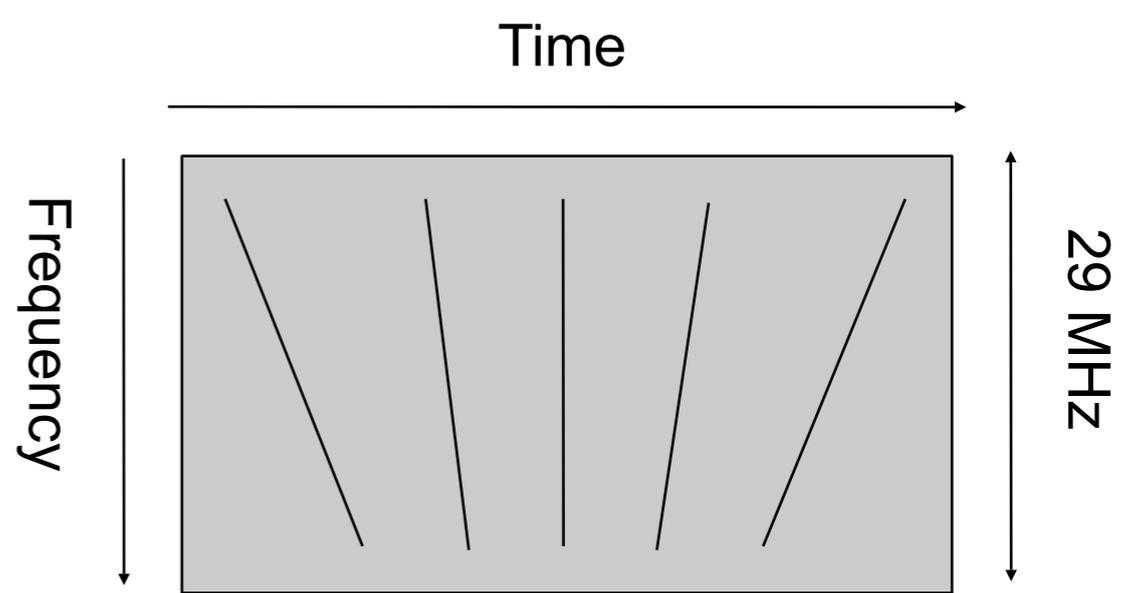
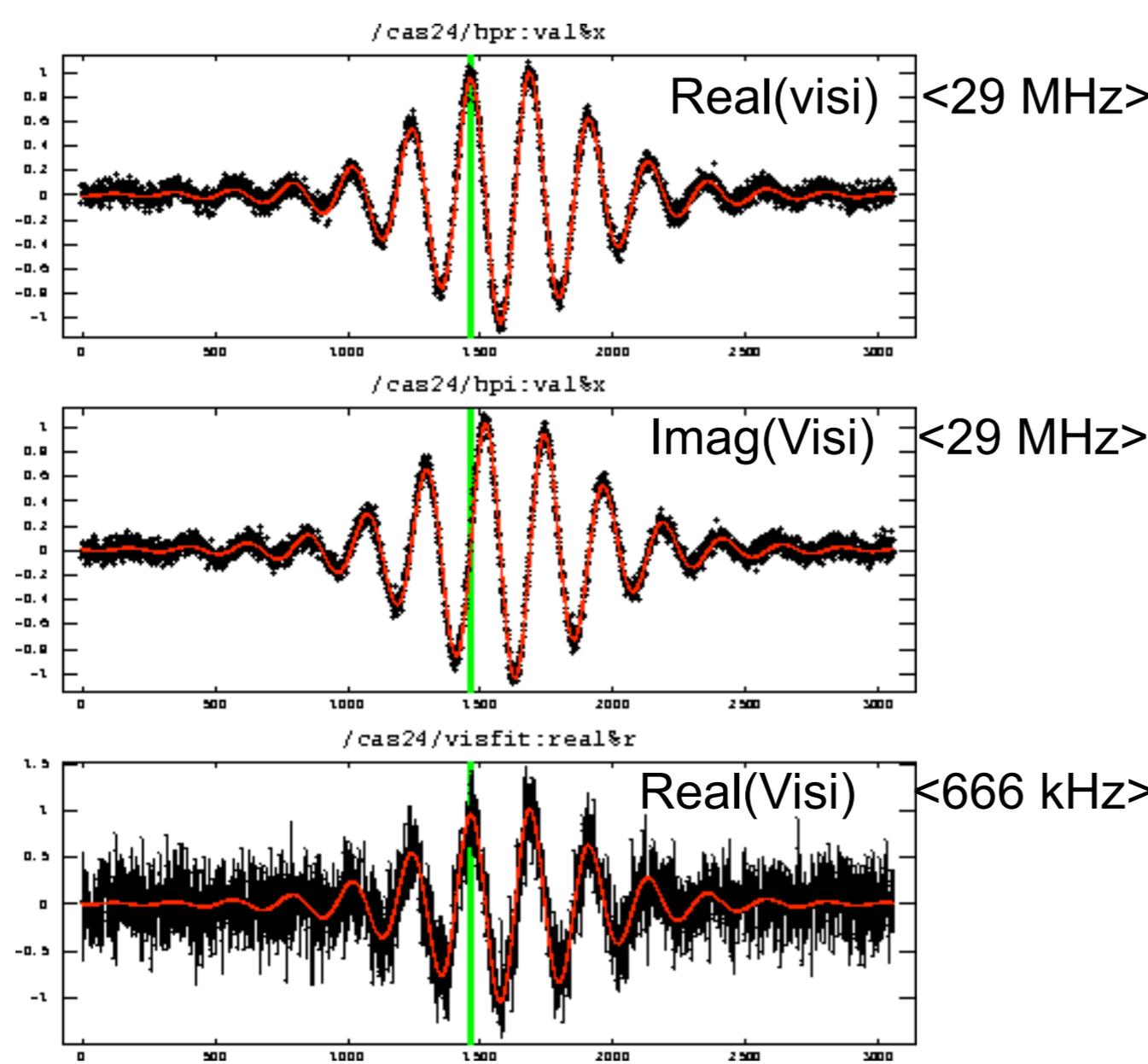
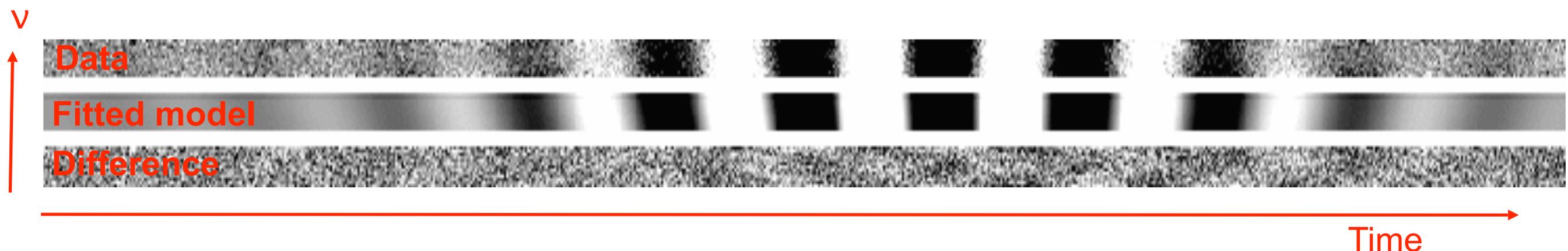


Pittsburgh, Novembre 2009



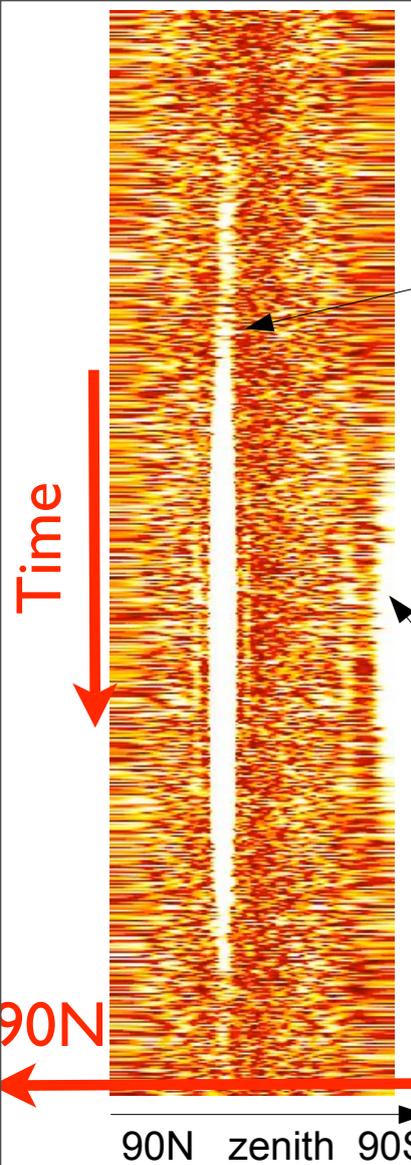
Pittsburgh, Novembre 2009

CasA24 - Pittsburgh/Nov 2009

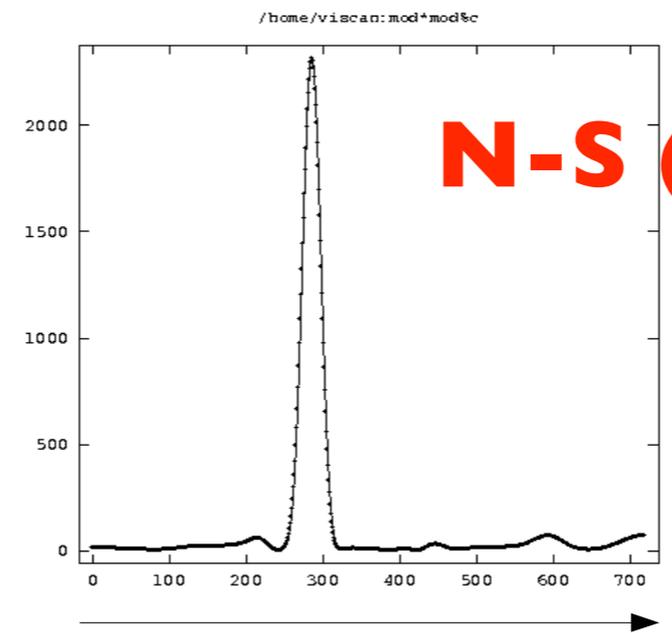


Enlarged fringe wave for low frequencies

Scan lobe N-S for CasA24nov <29 MHz>

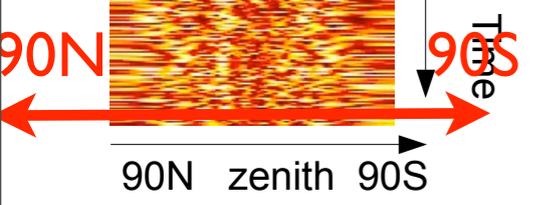


Module²

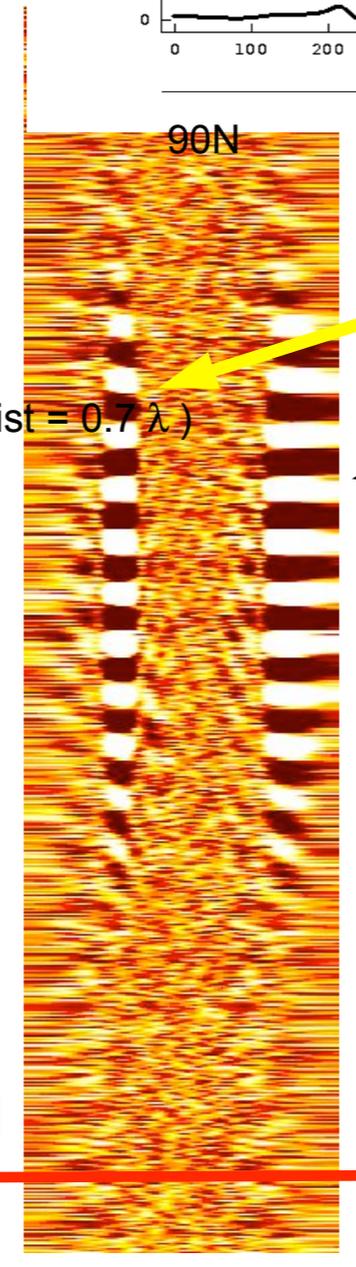


N-S (along the cylinder) lobe synthesis

-S for SunA24nov <29 MHz>

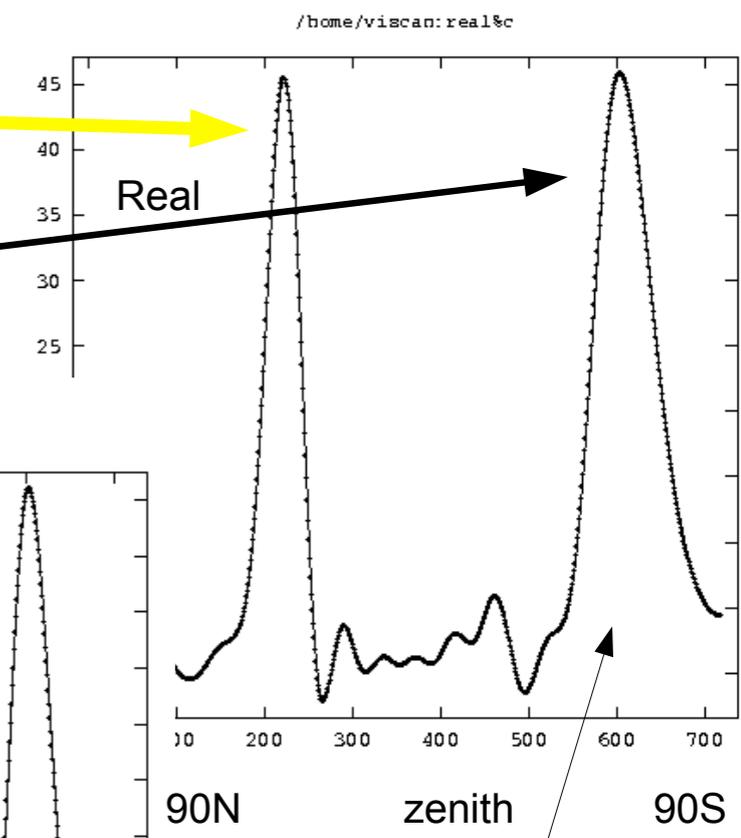


Nyquist folding (dipole dist = 0.7λ)



Nyquist

Sun

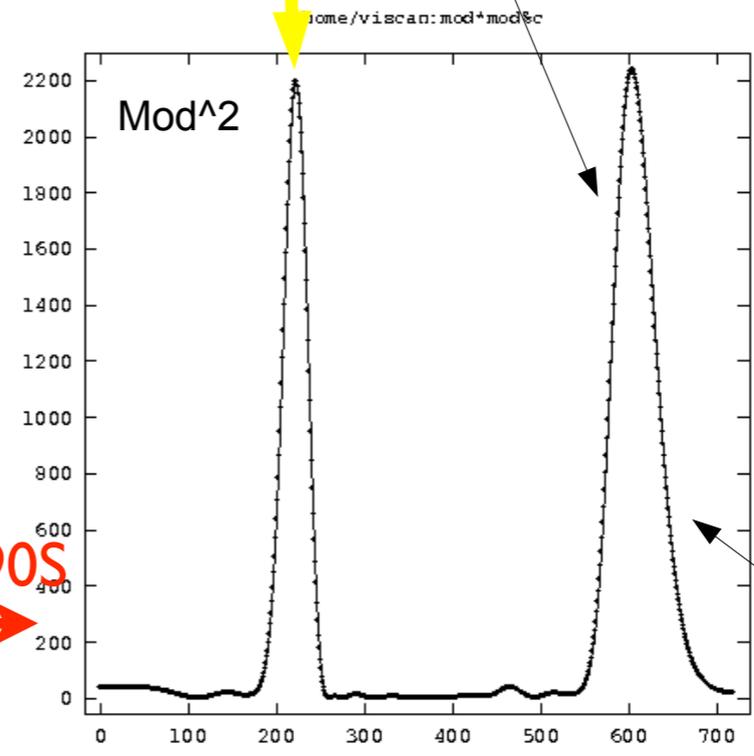


Time

90N

90S

90N 90S

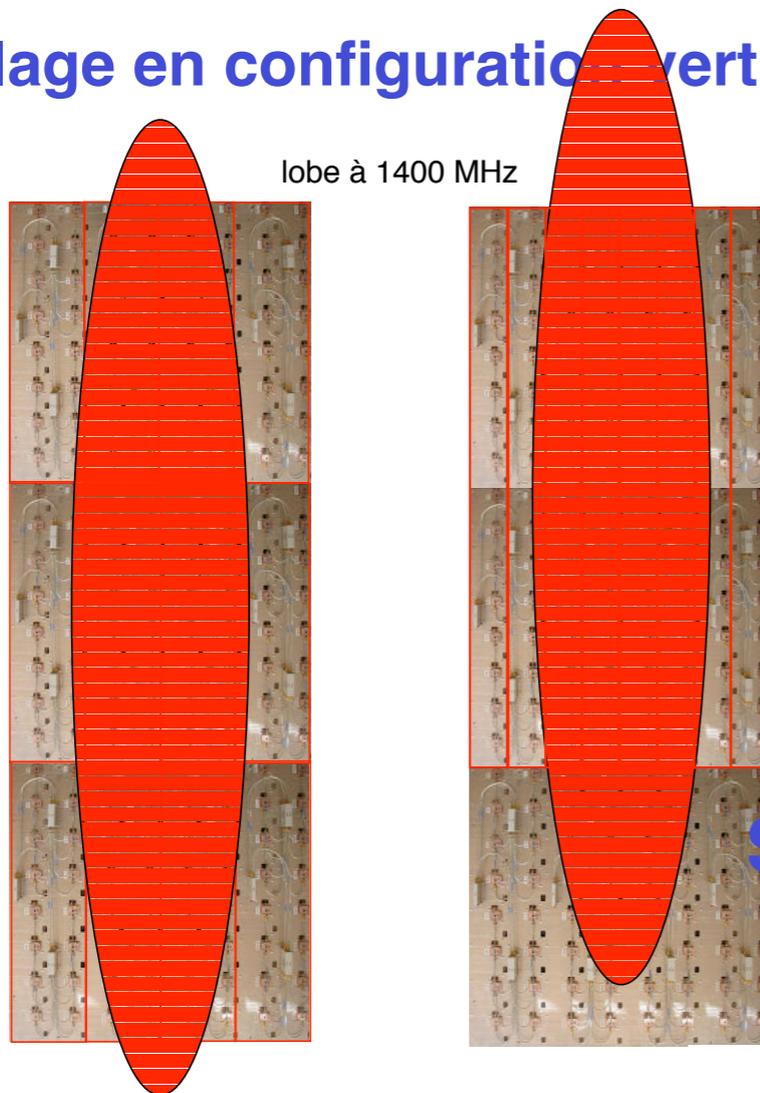


Non-sym. Shape
Remember that N-S lobe is $\sin(N*x)/\sin(x)$ with $x=\sin(\theta)$

Assemblage en configuration verticale

configuration nominale

12 voies
8 x 2 Vivaldis



un peu moins de rendement

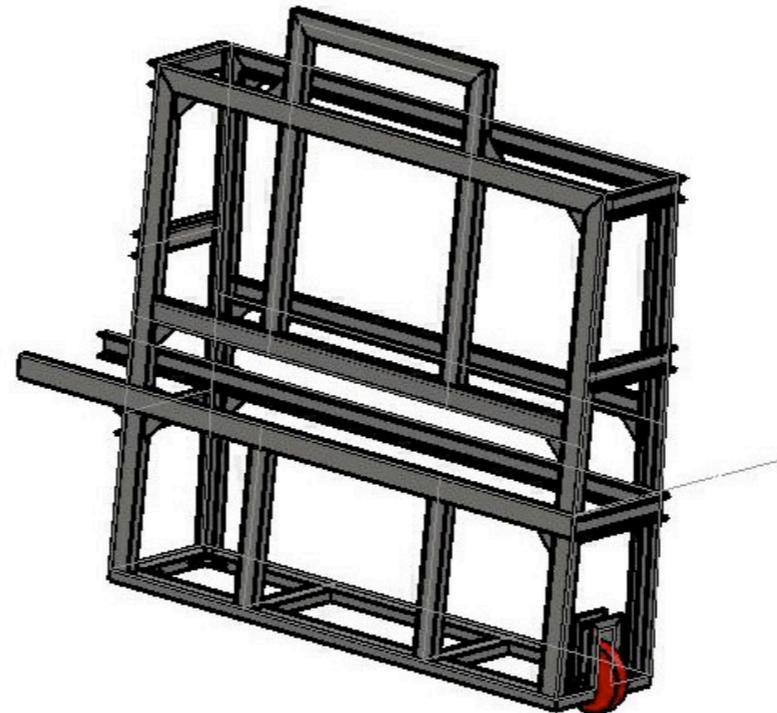
8 voies seulement
16 x 1 Vivaldi

test avec meilleur échantillonnage horizontal

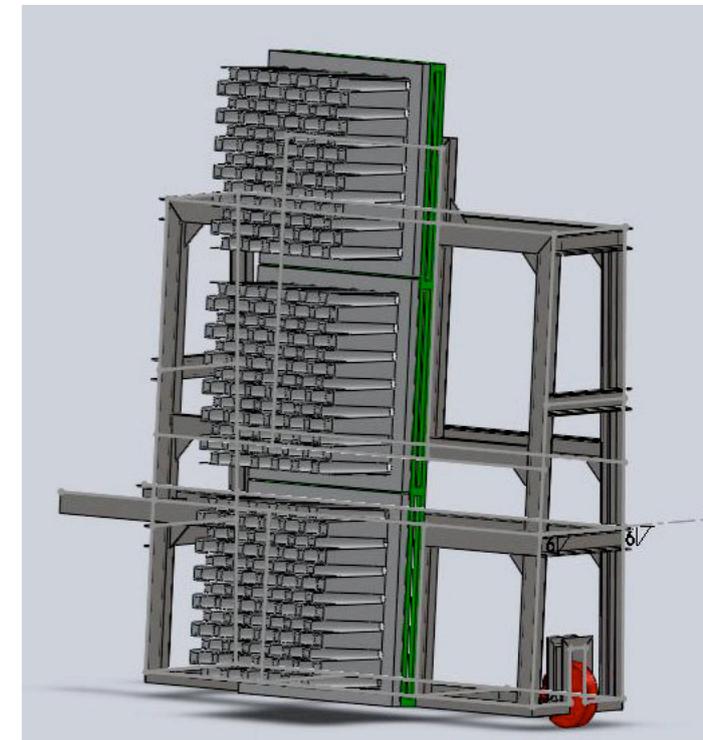
nécessite un câblage partiel des tuiles

Structure support du réseau

Prototype FAN

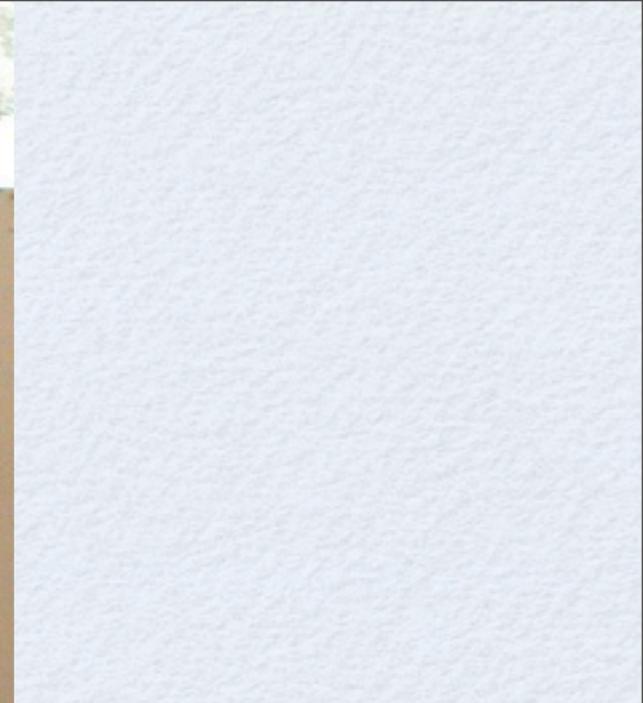


Structure fixée à l'Est du chariot



Avec antenne en configuration verticale (nominale)

- Interféromètre de test en utilisant des antennes de TV satellite du commerce
- 8 paraboles $D=3.5$ mètres (fabrication chinoise) ~ 400-500 \$ / paraboles ont été livrées au LAL en novembre 2009
- $S = 9.6 \text{ m}^2 \rightarrow \text{Stot} \sim 75 \text{ m}^2$ (équivalent $D \sim 10\text{m}$)
- Champ de vue à 21 cm : $\lambda / D \sim 3.5\text{-}4$ deg, on atteint 1 deg. de résolution avec un espacement de 12 mètres
- Etude mécanique en cours pour la réalisation de la monture (mécanique / électronique)
- Objectif de coût : 3-5 k€ / monture



Parabole montée au
LAL (Janvier 2010)

Vers un projet BAORadio réaliste ?

- Instrument à grand champ de vue et large bande
(Cartographie d'un grand volume de l'univers)
- Sensibilité instrumentale - Spectre du bruit $P_{noise}(k)$
pour différentes configurations cylindres / paraboles
- Estimation de coût et de planning pour le projet

$P(k)$ @21cm

PNoise(k)

PNoise(k) : Dishes/Cylinders, 64/72/129 channels

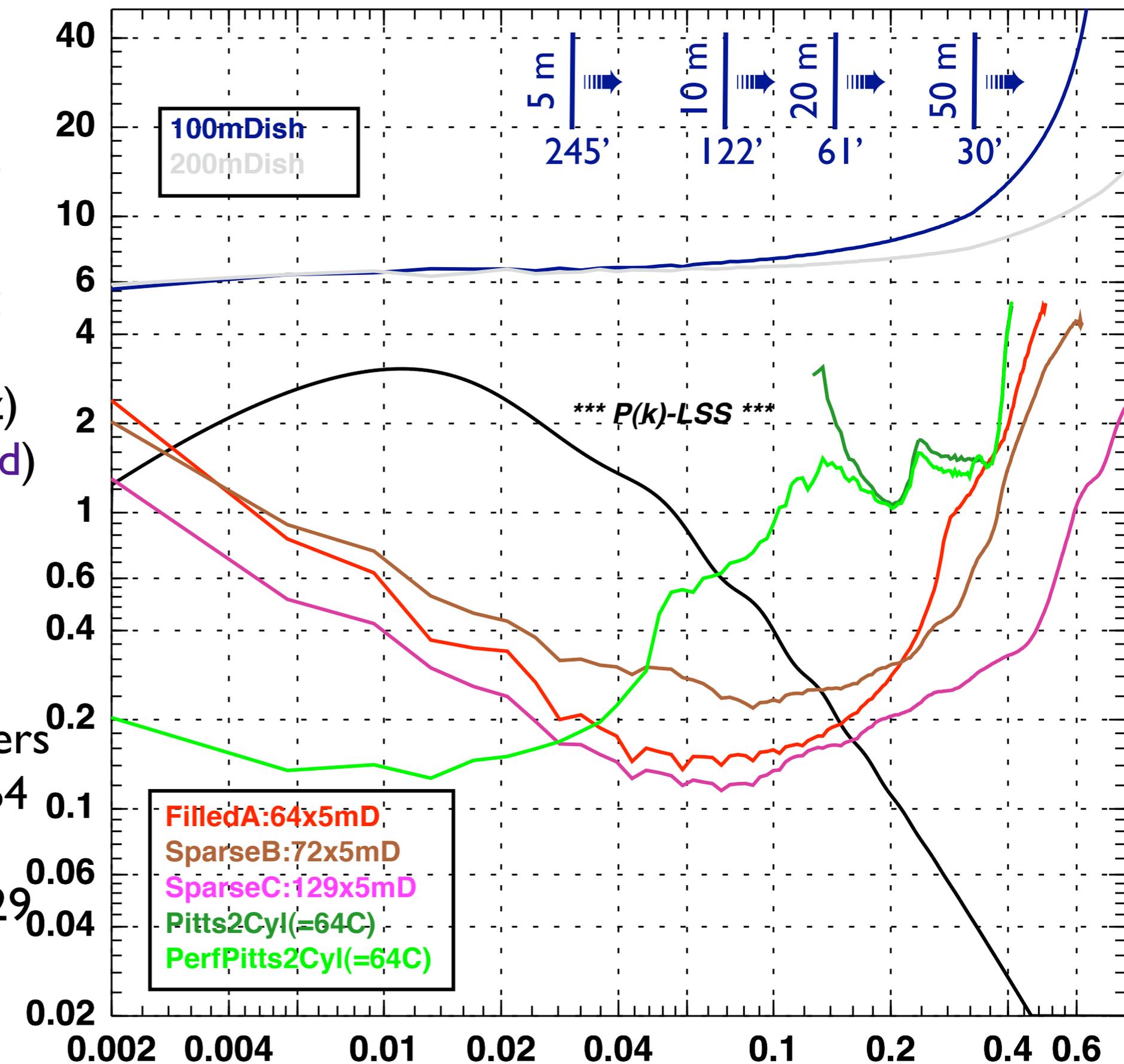
$\times 10^3$

PNoise(k) $m k^2 Mpc^3$

Noise power spectrum
 $z = 0.7$ ($\nu \approx 820$ MHz)
 for 10 000 sq.deg (π srad)
 survey

1 year total observation
 time

- 100m/200m single dish
- Pittsburgh like 2 cylinders
- Filled array with $8 \times 8 = 64$ dishes ($D=5m$)
- Sparse array with 72, 129 dishes ($D=5m$)



$P(k)$ @21cm

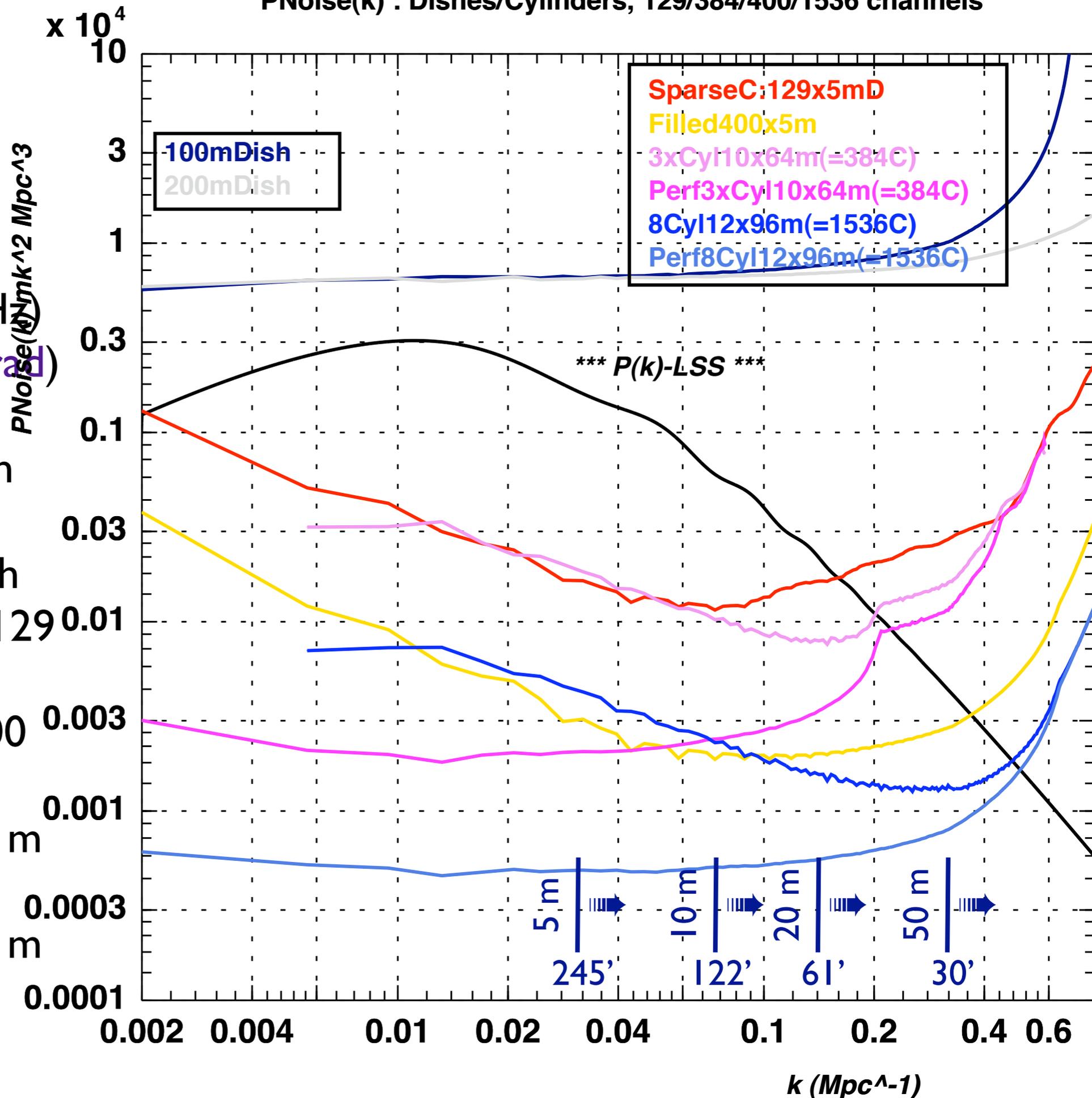
PNoise(k)

Noise power spectrum
 $z = 0.7$ ($\nu \approx 820$ MHz)
 for 10 000 sq.deg (π sr) survey

1 year total observation time

- 100m/200m single dish
- Sparse array with 72, 129 dishes ($D=5$ m)
- Filled array $20 \times 20 = 400$ dishes ($D=5$ m)
- 3 cylinders, $10\text{m} \times 64\text{m}$ (384 receivers)
- 8 cylinders, $12\text{m} \times 96\text{m}$ (1536 receivers)

PNoise(k) : Dishes/Cylinders, 129/384/400/1536 channels



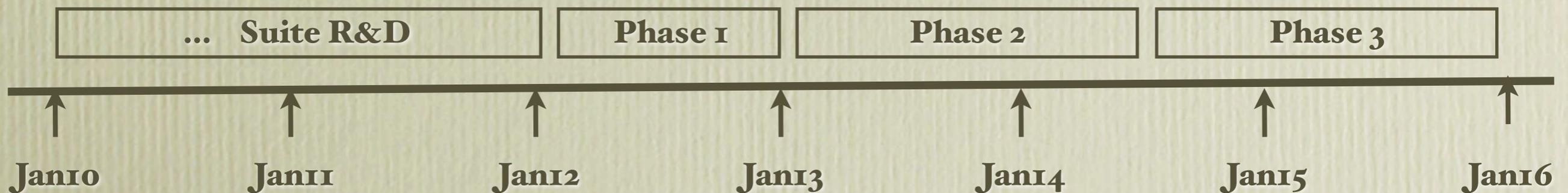
Un relevé radio pour la cosmologie et l'énergie noire, $z \leq 2$?

≡ Phase 1 , 32 x 2 polars = 64 voies, 600 m² → **500 k€**

- ◆ Réflecteur/mécanique ~400 €/ m² → **250 k€**
- ◆ Electronique/Acquisition 3000 - 4000 € / voie
 - Electronique (filtrage,numérisation) ~ 1500 € / canal
 - BeamFormer/Corrélateur ~ 1000 € / canal
 - CPU/stockage/connectique... ~ 1000 € / canal
- ◆ **Infrastructures / site ? 500-1000 k€ ?**

≡ Phase 2 , 128 x 2 polars = 256 voies, 2500 m² → **2000 k€**

≡ Phase 3 , 512 x 2 polars = 1024 voies, 10 000 m² → **10 000 k€**



SKA : < 100 MHz ... 20 GHz , < 1 arcsec resolution

Australian SKA Pathfinder
700-1800 MHz , 12 m dishes

ASKAP

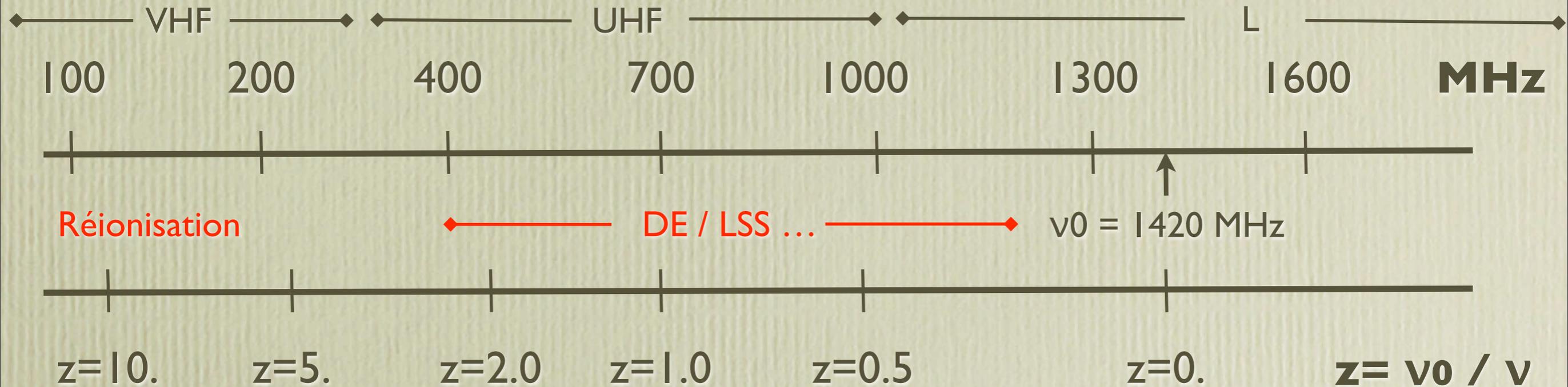
MWA

Karoo Array Telescope
500-3000 MHz

KAT/MeerKAT

Murchinson Wide Field
Array - 80-300 MHz

BAORadio / CRT



LOFAR

ATA (Allen Telescope Array)

Conclusions

- Perspectives scientifiques attrayantes (DE, Distribution de masse HI à $z \sim 1.5$...) pour un relevé cosmologique en radio
- Défis techniques (en électronique en particulier)
- Actuellement en phase de R&D et de validation scientifique et technique
- **BAO-Radio: Fenêtre d'opportunité scientifique et technique**
 - ➔ **Un projet phase pour 2015 et 10 M€ (10-15 M\$) ?**
- **Bon rapport retour scientifique / investissement**