# **POLARIMÉTRIE DU FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE** ENJEUX ET AVENIR

### Adnan Ghribi

Laboratoire AstroParticulet et Cosmologie Université Paris 7 Denis Diderot

Séminaire de Cosmologie Centre de physique des particules de Marseille 14 avril 2014

Sommaire	LES OBSERVABLES		QUBIC	PRISM	
•	0000	00000	0000	000	00

## Sommaire

INTRODUCTION LES OBSERVABLES **Besoins Instrumentaux** PolarBear Spécifications Instrument **Systématiques** Déploiement **OUBIC** Principe Spécifications Instrument Autocalibration PRISM Conclusion

INTRODUCTION	LES OBSERVABLES		QUBIC	PRISM	
•	0000	00000	0000	000	00

### INTRODUCTION



Adnan Ghribi (APC)

Séminaire CPPM

SOMMAIRE INTRODUCTION LES OBSERVABLES PolarBear QUBIC PRISM Conclusion 0 0 0000 0000 000 000 000

# LES OBSERVABLES

 $\blacktriangleright C_l^{TT} = \left\langle \left| a_{lm}^T \right|^2 \right\rangle$ 

- $\ \delta(T)_{TT}^{-45dB} = 80 \, \mu K$
- Réionisation / Pics acoustique / Damping
- $\blacktriangleright C_l^{EE}, C_l^{TE} = \left\langle a_{lm}^T a_{lm}^{E*} \right\rangle$ 
  - $\delta(T)_{EE}^{-70dB} = 300 \, nK$ - Anticorrélation avec TT
- ►  $C_l^{BB} = \left\langle \left| a_{lm}^B \right|^2 \right\rangle$  $- \frac{\delta(T)_{BB}^{-80dB}}{r \equiv P_{tenseur}/P_{scalaire}} = \frac{0.008(E_{inf}/10^{16} \, GeV)^4}{r^6}$

FIGURE : Mesures de spectres de puissance angulaires. (a) TT mesuré par Planck HFI [*Planck col. et al.*(2013)], (b) TE [*Chiang et al.*(2010)], (c) EE [*Barkats et al.*(2013)], (d) BB [*Bicep2 Col. et al.*(2014)]



Adnan Ghribi (APC)

	LES OBSERVABLES		QUBIC	PRISM	
	0000	00000	0000	000	00

## COMPOSANTES

- Séparation des composantes
  - Large couverture spectrale
  - Séparation spectrale précise

### Atmosphère

- Limite de la couverture spectrale
- Site d'observation adapté
- Stratégie d'étalonnage adaptée
- Architecture de détection adaptée



FIGURE : haut : Transmission de l'atmosphère [*Bicep2 Col. et al.*(2014)]. bas : Spectre du CMB et des avant-plans [*Bennett et al.*(2013)].

	LES OBSERVABLES		QUBIC	PRISM	
	0000	00000	0000	000	00

# Systématiques

- $\blacktriangleright T \to P$ 
  - Taille du lobe primaire
  - Niveau des lobes secondaires
  - Ellipticité
  - Erreurs de pointage
  - Erreur sur le canal spectral
  - Gain différentiel

#### $\blacktriangleright \ E \to B$

- Pointage
- Polarisation instrumentale

#### Autres

- bruit 1/f
- Erreurs dans l'estimation du bruit
- Stabilité thermiques
- Compatibilité
   Electromagnétique





SOMMAIRE INTRODUCTION LES OBSERVABLES PolarBear QUBIC PRISM Conclusion o o 0000 0000 0000 000 00

# **BESOINS INSTRUMENTAUX**

- Expériences au sol
  - Grande sensibilité
  - Nombreux canaux spectraux
  - Contrôle drastique des effets systématiques
  - Site d'observation très "propre"
  - Haute résolution angulaire pour les hauts l
  - Limite de variance cosmique pour les bas l

- Mission Spatiale
  - Grande sensibilité
  - Nombreux canaux spectraux
  - Contrôle drastique des effets
    - systématiques
  - Site d'observation très "propre"
  - Haute résolution angulaire pour les hauts l
  - Limite de variance cosmique pour les bas l

- Polarimétrie
  - Optique/faisceau
  - Séparation des polarisations
  - Filtrage
  - Grandes matrices détecteurs
- Architecture
  - Imagerie
  - Interférométrie

Trois exemples concrêts : PolarBear, QUBIC, PRISM

SOMMAIRE INTRODUCTION LES OBSERVABLES PolarBear QUBIC PRISM Conclusion o o 000● 00000 0000 000 000 00

# **BESOINS INSTRUMENTAUX**

- Expériences au sol
  - Grande sensibilité
  - Nombreux canaux spectraux
  - Contrôle drastique des effets systématiques
  - Site d'observation très "propre"
  - Haute résolution angulaire pour les hauts l
  - Limite de variance cosmique pour les bas l

Mission Spatiale

- Grande sensibilité
- Nombreux canaux spectraux
- Contrôle drastique des effets
  - systématiques
- Site d'observation très "propre"
- Haute résolution angulaire pour les hauts l
- Limite de variance cosmique pour les bas l

### Polarimétrie

- Optique/faisceau
- Séparation des polarisations
- Filtrage
- Grandes matrices détecteurs
- Architecture
  - Imagerie
  - Interférométrie

Trois exemples concrêts : PolarBear, QUBIC, PRISM

 SOMMAIRE
 INTRODUCTION
 Les Observables
 PolarBear
 QUBIC
 PRISM
 Conclusion

 0
 0
 000●
 00000
 0000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000
 000</td

# BESOINS INSTRUMENTAUX

- Expériences au sol
  - Grande sensibilité
  - Nombreux canaux spectraux
  - Contrôle drastique des effets systématiques
  - Site d'observation très "propre"
  - Haute résolution angulaire pour les hauts l
  - Limite de variance cosmique pour les bas l

## Mission Spatiale

- Grande sensibilité
- Nombreux canaux spectraux
- Contrôle drastique des effets
  - systématiques
- Site d'observation très-"propre"
- Haute résolution angulaire pour les hauts l
- Limite de variance cosmique pour les bas l

## Polarimétrie

- Optique/faisceau
- Séparation des polarisations
- Filtrage
- Grandes matrices détecteurs
- Architecture
  - Imagerie
  - Interférométrie

### Trois exemples concrêts : PolarBear, QUBIC, PRISM



- Objectifs Scientifique
  - Modes B primordiaux
    - r = 0.025 à  $2\sigma$  en deux ans
  - Modes B lentillés
    - ▶ 500 < *l* < 2100
- Spécifications à 150 GHz
  - 1274 (TES) $NET = 5 \,\mu K \sqrt{s}$
  - Lobe primaire
    - 3,8 arcmin
  - Multiplexage en fréquence Facteur de multiplexage 8 : 1



FIGURE : Pourcentage de transmission en fonction de l'épaisseur de vapeur d'eau précipitable au plateau du Chajnantor. La PWV est dessous de 1mm plus de 50% du temps [*Tremblin et al.*(2012)].



# POLARBEAR

#### INSTRUMENT

Téléscope

- Cryostat
- Plan focal
  - Téléscope Grégorian hors axe Miroir primaire 3,5m haute précision sur 2,5 m



FIGURE : Simulation optique du téléscope HTT : chemin optique, champs de vue et rapport de Strehl.



#### INSTRUMENT



Cryostat ►



FIGURE : Vue en coupe du cryostat de PolarBear.

		Les Observables 0000	PolarBear ○●○○○	QUBIC 0000	PRISM 000	Conclusion 00
Dorir	Drin					

## POLARBEAR

#### INSTRUMENT

- Téléscope
- Cryostat
- Plan focal



FIGURE : Plan focal de PolarBear. A gauche : les 7 matrices et la structure thermo-mécanique. A droite, de haut en bas : Un module vue arrière, un module vue avant, un pixel, un bolomètre.

0	0	0000	0000	0000	000	00
	_					

## POLARBEAR

INSTRUMENT

- Téléscope
- Cryostat
- Plan focal



FIGURE : (a) fit d'une gaussienne sur 1015 bolomètres actifs observant Saturne. (b) lobe sur tous les détecteurs, observation de saturne. (c) histogramme des lobes FWHM des pixels. (d) histogramme des ellipticités des pixels

		Les Observables 0000	PolarBear ○●○○○	QUBIC 0000	PRISM 000	Conclusion 00
Polar	Bear		Instr	RUMENT		

- Téléscope
- Cryostat
- Plan focal



		LES OBSERVABLES	PolarBear	QUBIC	PRISM	
POLAR	Bear	Systém	ATIOUES &	ETALON	NAGE (1/	/2)

- Etalonnage Dans le ciel
  - Tau A (Nébuleuse du Crabe)
    - Angle de la polarisation
  - Sources ponctuelles
    - lobes
  - Atmosphère
    - Gain relatif
  - Température du CMB
    - Gain absolu
  - Spectre EB, TE
    - Polarisation/test de nul
  - Stratégie de scan
    - Rotation du ciel
    - Angles d'attaque



FIGURE : Mesure des paramètres de Stockes Q,  $U,P = sqrt(Q^2 + U^2)$  avec et sans convolution avec Aumont et al.(2010) [*Kermich et a.*(2012)].

		LES OBSERVABLES	PolarBear	QUBIC	PRISM	
POLAR	Bear	Systém	ATIOUES &	ETALON	NAGE (1)	(2)

- Tau A (Nébuleuse du Crabe)
  - ► Angle de la polarisation
- Sources ponctuelles
  - lobes
- Atmosphère
  - Gain relatif
- Température du CMB
  - Gain absolu
- Spectre EB, TB
  - Polarisation/test de nul
- Stratégie de scan
  - Rotation du ciel
  - Angles d'attaque



FIGURE : Mesure des paramètres de Stockes Q,  $U,P = sqrt(Q^2 + U^2)$  avec et sans convolution avec Aumont et al.(2010) [*Kermich et a.*(2012)].

		Les Observables 0000	PolarBear ○○●○○	QUBIC 0000	PRISM 000	Conclusion 00
Polar	BEAR	Systém	ATIOUES &	ETALON	NAGE (1/	(2)

- Tau A (Nébuleuse du Crabe)
  - Angle de la polarisation
- Sources ponctuelles
  - lobes
- Atmosphère
  - Gain relatif
- Température du CMB
  - Gain absolu
- Spectre EB, TB
  - Polarisation/test de nul
- Stratégie de scan
  - Rotation du ciel
  - Angles d'attaque



FIGURE : Suppression de l'effet des fluctuations de l'atmosphère dans le bruit spectral à partir de la différentiation de plusieurs pixels. [Kermich et a.(2012)]

		Les Observables 0000	PolarBear ○○●○○	QUBIC 0000	PRISM 000	Conclusion 00
Polar	BEAR	Systém	ATIOUES &	ETALON	NAGE (1/	(2)

- Tau A (Nébuleuse du Crabe)
  - Angle de la polarisation
- Sources ponctuelles
  - lobes
- Atmosphère
  - Gain relatif
- Température du CMB
  - Gain absolu
- Spectre EB, TE
  - Polarisation/test de nul
- Stratégie de scan
  - Rotation du ciel
  - Angles d'attaque



FIGURE : Suppression de l'effet des fluctuations de l'atmosphère dans le bruit spectral à partir de la différentiation de plusieurs pixels. [Kermich et a.(2012)]

		Les Observables 0000	PolarBear ○○●○○	QUBIC 0000	PRISM 000	Conclusion 00
Polar	BEAR	Systém	ATIOUES &	ETALON	NAGE (1/	(2)

- Tau A (Nébuleuse du Crabe)
  - Angle de la polarisation
- Sources ponctuelles
  - lobes
- Atmosphère
  - Gain relatif
- Température du CMB
  - Gain absolu
- Spectre EB, TB
  - Polarisation/test de nul
- Stratégie de scan
  - Rotation du ciel
  - Angles d'attaque



FIGURE : Suppression de l'effet des fluctuations de l'atmosphère dans le bruit spectral à partir de la différentiation de plusieurs pixels. [Kermich et a.(2012)]

		LES OBSERVABLES	PolarBear	QUBIC	PRISM	
		0000	00000	0000	000	00
POLA	RBEAR	Systém	ATIOUES &	ETALON	NAGE (1)	(2)

- Tau A (Nébuleuse du Crabe)
  - Angle de la polarisation
- Sources ponctuelles
  - lobes
- Atmosphère
  - Gain relatif
- Température du CMB
  - Gain absolu
- Spectre EB, TB
  - Polarisation/test de nul
- Stratégie de scan
  - Rotation du ciel
  - Angles d'attaque



FIGURE : Haut : Scans à élévation constante avec avantage de la rotation du ciel (angles d'attaque différents). Bas : Zones d'observation de PolarBear . [Kermich et a.(2012)]

		LES OBSERVABLES	PolarBear	QUBIC	PRISM	
		0000	00000	0000	000	00
POLAF	RBEAR	Systém	ATIOUES &	ETALON	NAGE (2)	(2)

### Etalonnage sur le site

- Source infra-rouge (Stimulator)
  - Gain relatif, plarisation relative
- Source en champ lointain (Diode Gunn)
  - Polarisation absolue
- Source de polarisation (Dielectric sheet)
  - Polarisation absolue
- Spectromètre à transformée de Fourrier (FTS)
  - Réponse spectrale
- Lâme demi-onde
  - Polarisation relative











Sommaire	Introduction	Les Observables	PolarBear	QUBIC	PRISM	Conclusion
0	0	0000	○○○○●	0000	000	00
-	-					

## POLARBEAR

### Dépoloiement & Mesures



		Les Observables 0000	PolarBear ○○○○●	QUBIC 0000	PRISM 000	Conclusion 00
D	D					

## POLARBEAR

#### DÉPOLOIEMENT & MESURES



FIGURE : (a,b) Compensation des erreurs de pointage par correction de tilt. (b,c) Correction des aberration par correction sur la surface des miroirs (Dec. 2011).

FIGURE : (a,b) Spectres de puissance angulaires TT, EE et BB du CMB avec 1 an de données et autocalibration TE/EB.[*PolarBear col. et al.*(2014)].

Adnan Ghribi (APC)

Séminaire CPPM

	LES OBSERVABLES	PolarBear	QUBIC	PRISM	
OUBIC		Princi	PE		

#### Interférométrie classique

- Propreté de détection
- mitigation des effets systématiques
- Nécessité de corrélateurs
- Imagerie
  - Sensibilité de détection

#### Interférométrie bolométrique

- Mesure directe des visibilités sur le ciel
- Moins sensible aux fluctuations de l'atmosphère
- Sensibilité limitée par le bruit de photon



	Les Observables 0000	PolarBear 00000	QUBIC ○●○○	PRISM 000	Conclusion 00
OUBIC	SITE, SPÉC	IFICATIONS	5 et Obie	CTIFS	

- Objectifs Scientifique
  - Modes B primordiaux
    - ▶  $r = 0.005 à 2\sigma en 1 an$
  - Premier pic acoustique
    - ▶ 50 < *l* < 200
- ▶ Spécifications à 150 *GHz* 
  - 2048 TES  $NEP_{det} = 4.10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
  - 400 cornets
    !400 lignes de base
  - Multiplexage temporel Facteur de multiplexage 128 : 1





FIGURE : Pourcentage de transmission en fonction de l'épaisseur de vapeur d'eau précipitable au Dome C. La PWV est dessous de 0.6mm plus de 50% du temps [Tremblin et al.(2012)].

	Les Observables 0000	PolarBear 00000	QUBIC ○○●○	PRISM 000	Conclusion 00
QUBIC		Instrum	ENT		

- 400 cornets corrugués
  - FWHM = 14°
  - Plaques Al empilée
- 400 commutateurs électromécaniques intégrés
- Lâme demi-onde achromatique
  - Lithographie sur support diélectrique
- Combinateur quasi-optique
  - Système Grégorien hors axe
  - Focale 300 mm
  - Miroirs 0, 5 m





FIGURE : De haut en bas : Cornet par empilement de plaques usinées, HWP achromatique, Simulation du combineur optique de QUBIC.

	LES OBSERVABLES	PolarBear		PRISM	
OUBIC		Instrum	IENT		

#### Détecteurs

- 2048 TES
- $NEP = 10^{-17} unit frac W \sqrt{Hz}$
- $T_c = 0, 4 K$
- Absorbeur Ti Pd
- Membrane  $SiN_x$
- Thermomètre  $Nb_xSi_{1-x}$
- Electronique de lecture
  - 2048 SQUIDs @ 4 K
  - 16 ASIC SiGe @ 77 K



FIGURE : De haut en bas : Cornet par empilement de plaques usinées, HWP achromatique, Simulation du combineur optique de QUBIC [Martino et al.(2013)].

	Les Observables 0000	PolarBear 00000	QUBIC ○○●○	PRISM 000	Conclusion 00
<b>-</b>					

## QUBIC

### Détecteurs

- 2048 TES
- $NEP = 10^{-17} unit frac W \sqrt{Hz}$
- $T_c = 0, 4 K$
- Absorbeur *Ti Pd*
- Membrane SiN<sub>x</sub>
- Thermomètre  $Nb_xSi_{1-x}$

### Electronique de lecture

- 2048 SQUIDs @ 4 K
- 16 ASIC SiGe @ 77 K

FIGURE : Schéma d'électronique de lecture pour QUBIC [*Prêle et al.*(2013)].

#### INSTRUMENT



		Les Observables 0000	PolarBear 00000	QUBIC ○○●○	PRISM 000	Conclusion 00
OUBI	2		Instrum	IENT		



FIGURE : Intégration des sous systèmes de l'instrument QUBIC [Crédit C. Chaperon].

Sommaire	Introduction	Les Observables	PolarBear	QUBIC	PRISM	Conclusion
0	0	0000	00000	○○○●	000	00
QUBIC		А	UTOCALIB	RATION		

 Utiliation de la redondance de lignes de base

[Charlassier et al.(2010)]

- Utilisation d'une source polarisée
- Variation du nombre de lignes de base
- Estimation de tous les systématiques instrumentales [bigot et al.(2012)]

 $n_h$  = nombre de cornets  $n_h$  = nombre de bolomètres  $n_h$  = nombre de pointages Visibilités

 $\blacktriangleright V_{ij} = M_{ij}.V_{\beta} + n_{ij}$ 

- Inconnues
  - $n_u = 4 \times n_h \times n_q + 2 \times n_p + 8 \times n_h + 8$
- Contraintes après étalonnage
  - $n_c = 6 \times n_h \times (n_h 1)/2 \times n_q \times n_p + 8$

Exemple $\begin{cases} n_h = 9 \\ n_q = 4 \\ n_p = 10 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} n_u = 262 \\ n_c = 8648 \end{cases}$ 

	LES OBSERVABLES	PolarBear	QUBIC	PRISM	
OUBIC	Д	UTOCALIB	RATION	000	

 Utiliation de la redondance de lignes de base

[Charlassier et al.(2010)]

- Utilisation d'une source polarisée
- Variation du nombre de lignes de base
- Estimation de tous les systématiques instrumentales [bigot et al.(2012)]



FIGURE : Image synthétique réelle corrigée (bleu) et non corrigée (rouge) en fonction de l'image synthétique idéale [*bigot et al.*(2012)].

	Les Observables 0000	PolarBear 00000	QUBIC 0000	PRISM ●00	Conclusion 00
DDICN					

## PRISM/CORE+

Science

- Modes B du CMB  $EE \rightarrow l \sim 2500$   $BB \rightarrow l \sim 1100$ 
  - $r \mid N_{eff} \mid \sum m_{\nu} \mid n_s \mid n_t$
- Distorsions spectrales du CMB

 $\Delta(I_{\nu})/I_{nu} \leq 10^{-5}$ 

- Non Gaussianités
- Lentillage gravitationnel
- ISM
- Amas de galaxies
- ► CIB





FIGURE : Simulation de la reconstruction du lentillage gravitationnel avec Planck et PRISM [*PRISM white paper(2013)*].

	Les Observables 0000	PolarBear 00000	QUBIC 0000	PRISM ○●○	Conclusion 00

# PRISM/CORE+

Deux instruments

- ► Polarimètre-Imageur Téléscope (3, 5 m,0, 8 m)  $\nu = [30 - 6000] GHz$   $n_{\nu} = 32 | \delta \nu / \nu = 0, 25$ 7600 détecteurs 0, 6 < NEP < 7 $[10^{-18} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}]$
- Spectrophotomètre absolu Lobe 1, 4°  $\Delta \nu_1 = 0, 5 GHz$  $\Delta \nu_1 = 15 GHz$
- Etalonnage
  - Satellite auxiliaire
  - Balayage sur le ciel
  - Intercorrélation spectromètre/imageur



FIGURE : Représentation du satellite proposé PRISM [*PRISM white paper*(2013)].



- Réduire les objectifs scientifique Se concentrer sur les modes B
- Réduire la taille des miroirs
- Réduire le nombre de canaux

- Un seul instrument!
  - Téléscope 2,5 m
  - $-\nu = [30 6000] GHz$
  - $-n_{\nu}=32 \mid \delta \nu / \nu = 0,25$
  - 4700 détecteurs
  - Pas de satellite auxiliaire





- Réduire les objectifs scientifique Se concentrer sur les modes B
- Réduire la taille des miroirs
- Réduire le nombre de canaux

- Un seul instrument!
  - Téléscope 2,5 m
  - $\nu = [30 6000] GHz$
  - $-n_{\nu}=32 \mid \delta \nu / \nu = 0,25$
  - 4700 détecteurs
  - Pas de satellite auxiliaire



 $\Rightarrow$  La technologie est prête mais pas en Europe !

	LES OBSERVABLES		QUBIC	PRISM	Conclusion
	0000	00000	0000	000	00

## CONCLUSION

 1914–1929 Relativité & Expansion

1964
 Découverte du CMB

► 1980 L'engouement

► 1992 Spectre & Anisotropies

• 2001 Modes E

 2014 Modes B



- Spider
- PIPER
- SPTpol
- Keck Array
- QUBIC
- Poincare
- PolarBear
- Confirmation de la détection
- Meilleures contraintes les modèles inflationnaires (r, n<sub>s</sub>, n<sub>t</sub>)
- Contrainte sur la somme de la masse des neutrinos
- Corrélation avec d'autres sondes (relevés galactiques, BAO, ...)
- Evolution vers les grandes matrices de détecteurs et technologies biomimétiques





vient juste de commencer !

Adnan Ghribi (APC)

Séminaire CPPM

		Les Observables 0000	PolarBear 00000	QUBIC 0000	PRISM 000	Conclusion 00
BACK	UP	BIC	EP2, FIRST	DETECTI	on ?	

