

Modes B de polarisation du CMB: intérêt et projets

*Pourquoi diable devrait-on encore faire des détecteurs ultra-sensibles pour le CMB
alors que Planck a été si magnifiquement lancé hier ?*

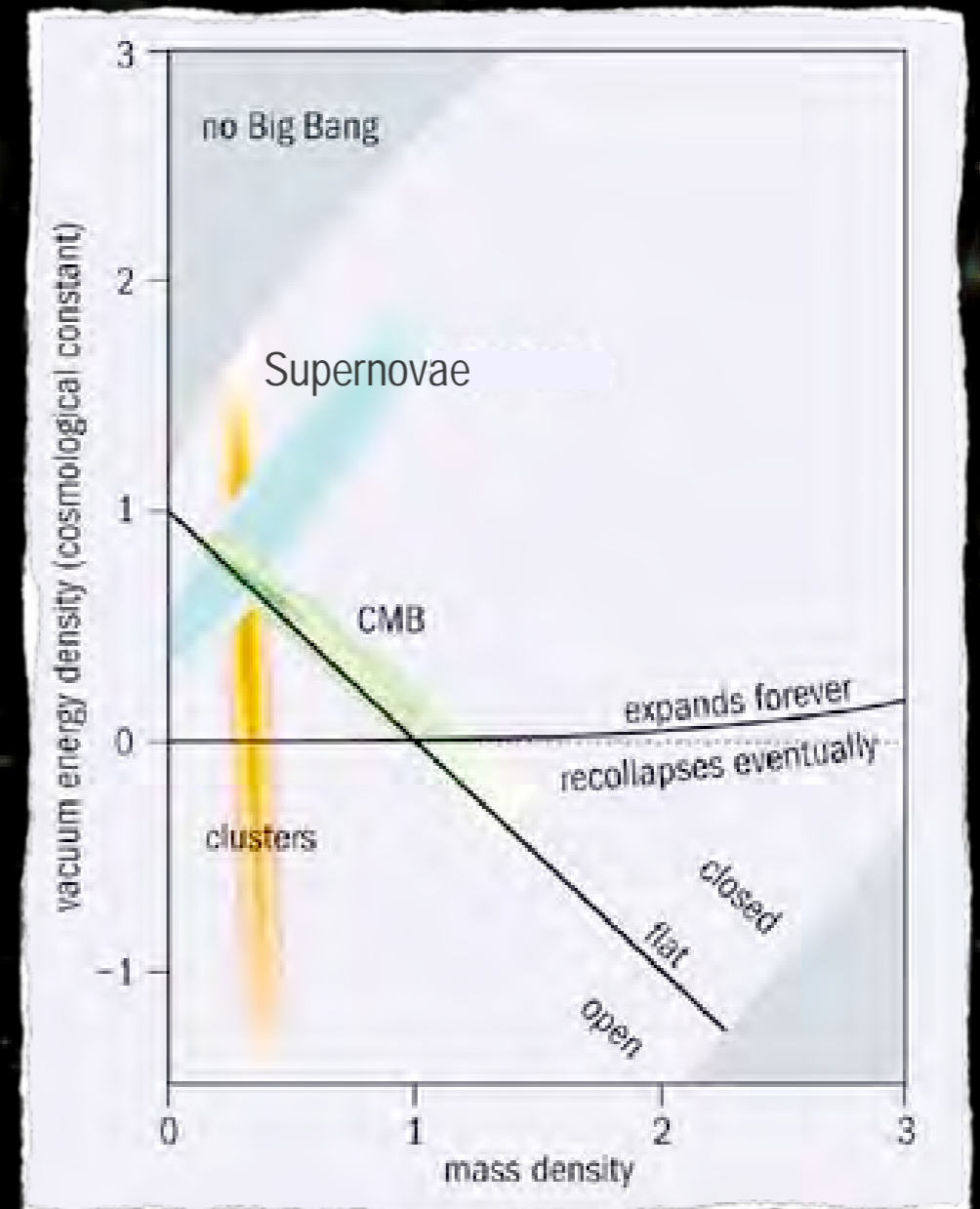


J.-Ch. Hamilton (APC, Paris)



ce que l'on sait déjà

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - L'Univers est en expansion
 - Constante de Hubble
 - L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
 - Il contient de la matière noire
 - quantité connue, nature inconnue
 - Il contient de l'énergie sombre
 - quantité connue, nature inconnue

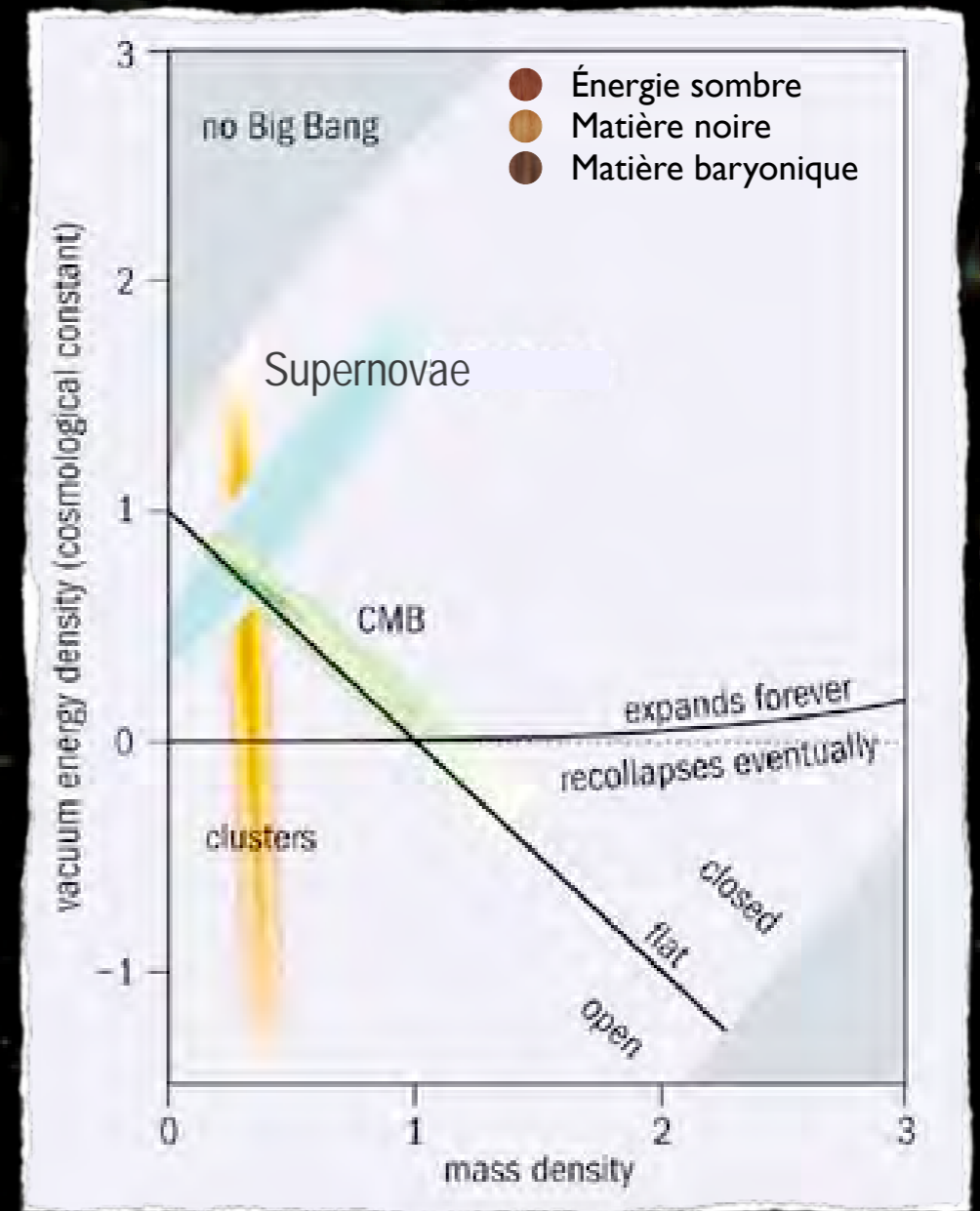


Crédits : CMB (T et E), SNIa et catalogues de galaxies



ce que l'on sait déjà

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - L'Univers est en expansion
 - Constante de Hubble
 - L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
 - Il contient de la matière noire
 - quantité connue, nature inconnue
 - Il contient de l'énergie sombre
 - quantité connue, nature inconnue

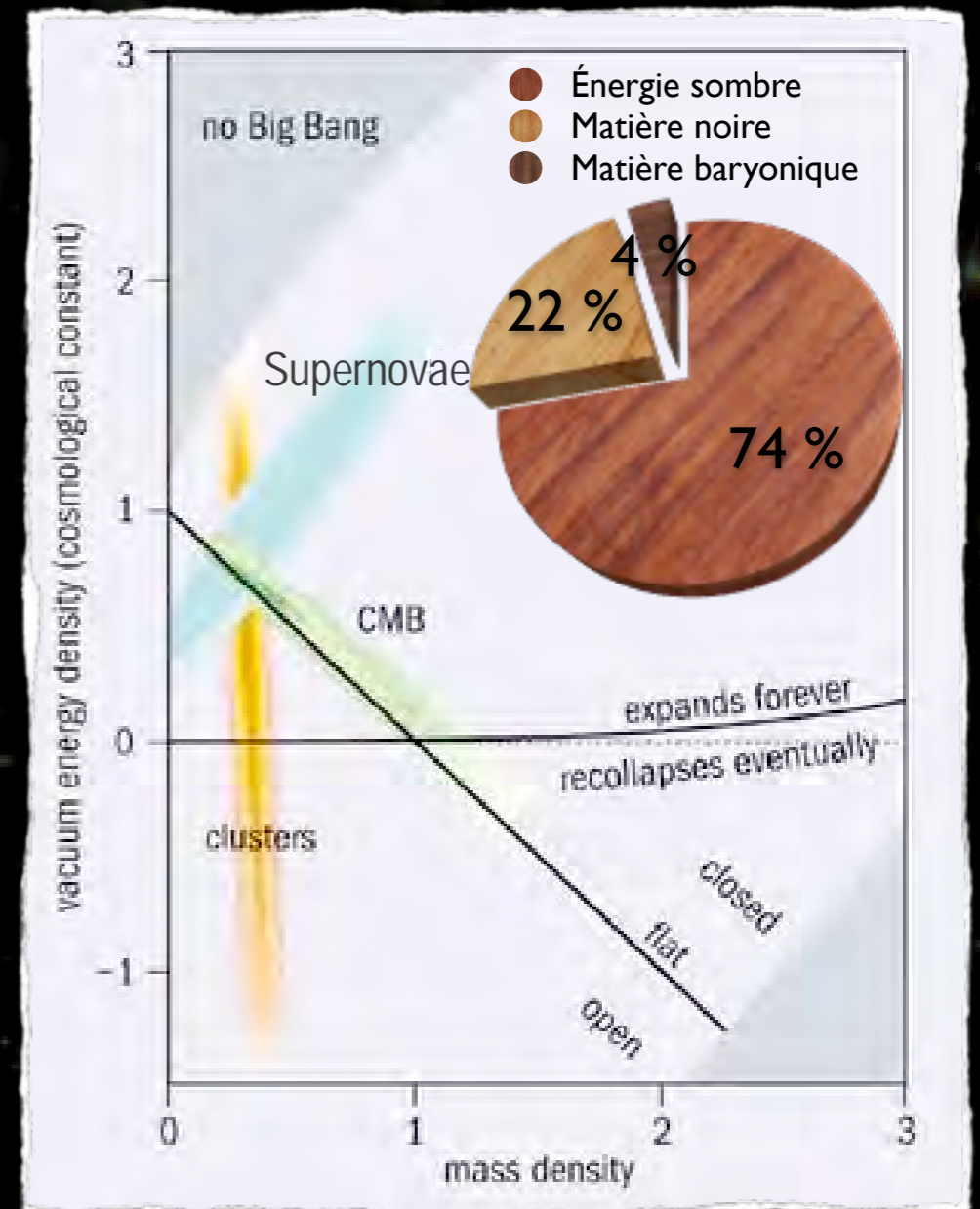


Crédits : CMB (T et E), SNIa et catalogues de galaxies



ce que l'on sait déjà

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - L'Univers est en expansion
 - Constante de Hubble
 - L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
 - Il contient de la matière noire
 - quantité connue, nature inconnue
 - Il contient de l'énergie sombre
 - quantité connue, nature inconnue

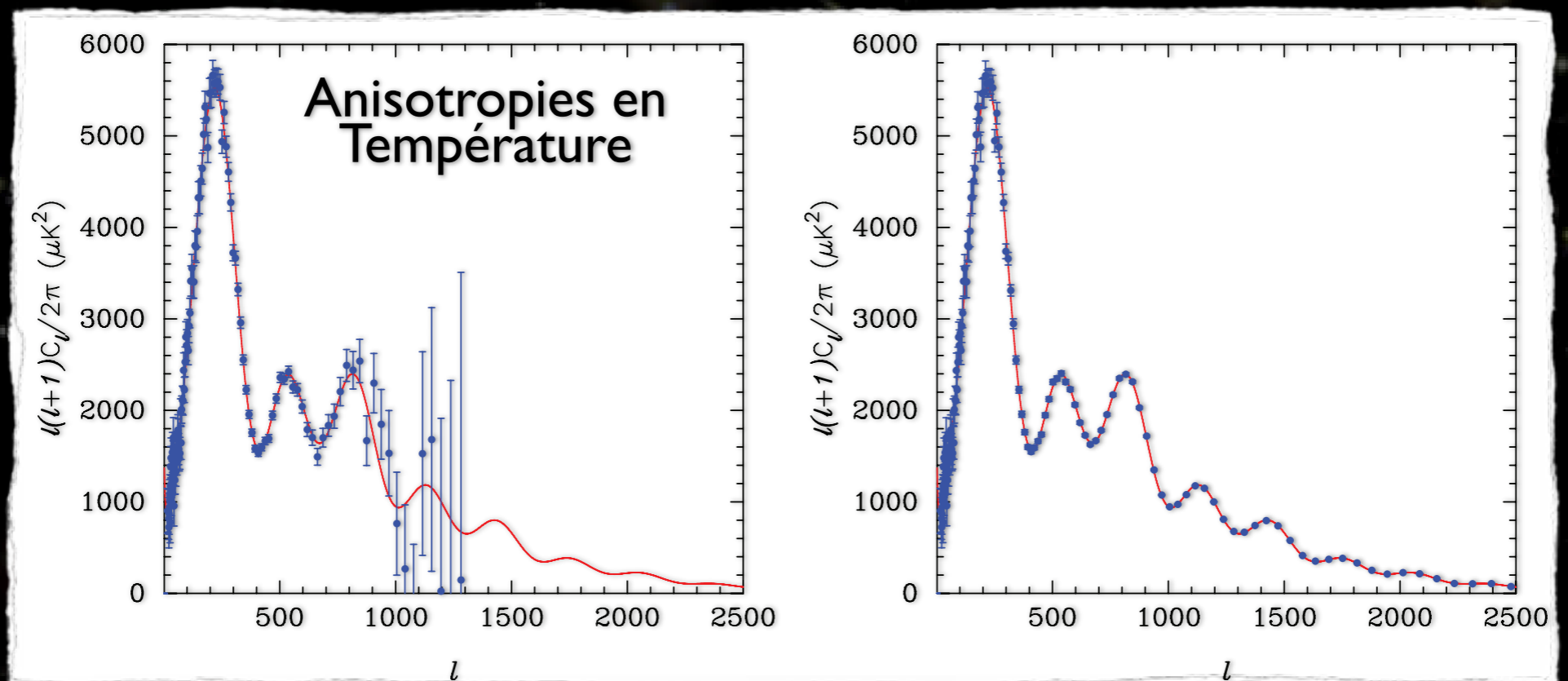
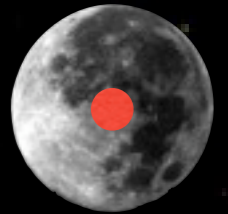


Crédits : CMB (T et E), SNIa et catalogues de galaxies



Ce que l'on saura après Planck

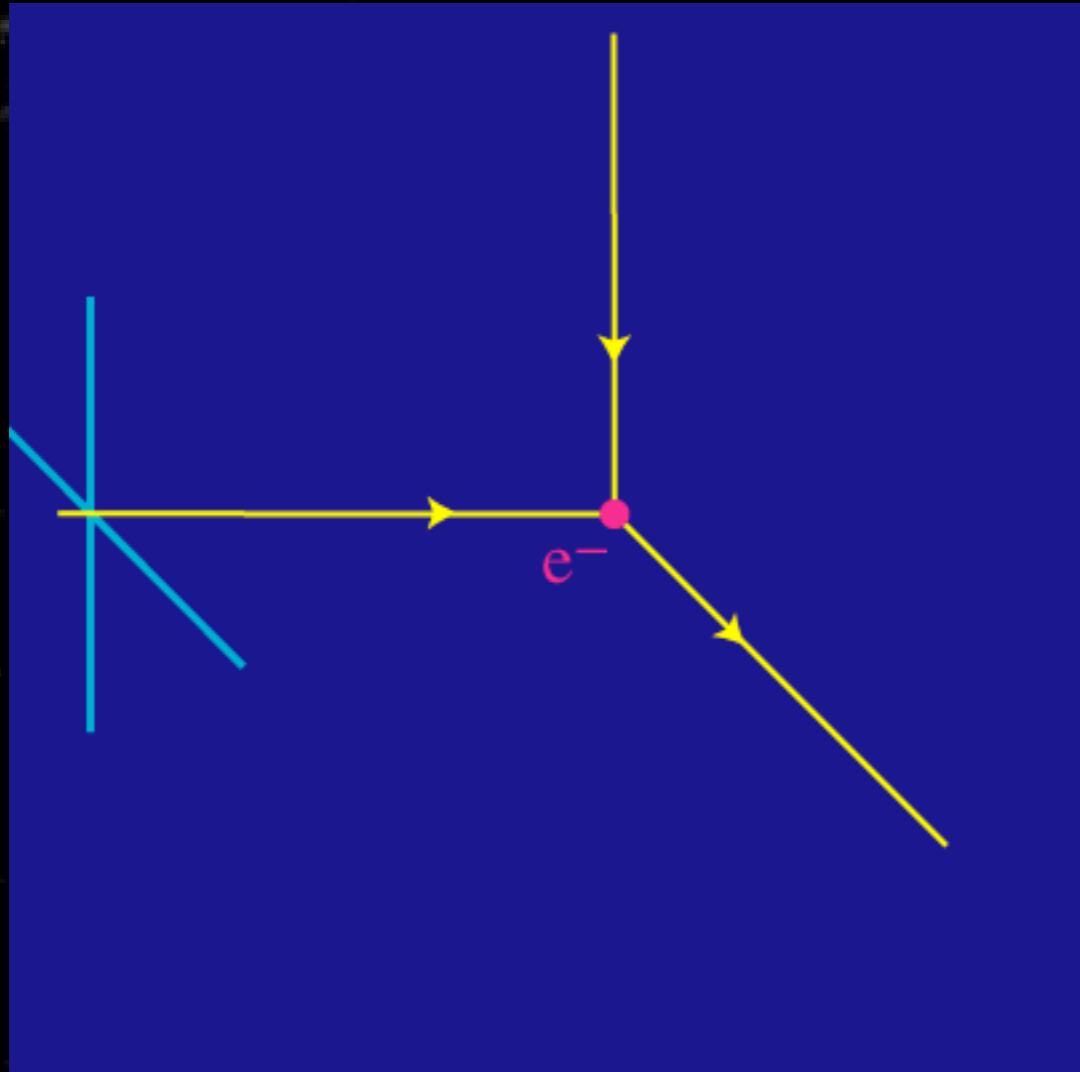
- Résolution angulaire : 5 arcminutes (1/6 de la lune)
- Sensibilité : 5 mK / pixel de résolution (0.0002 % sur 2.73 K)
- Gain d'un facteur 3-10 sur les paramètres cosmologiques



(Planck Bluebook)



Le CMB est polarisé (10%) !



W. Hu

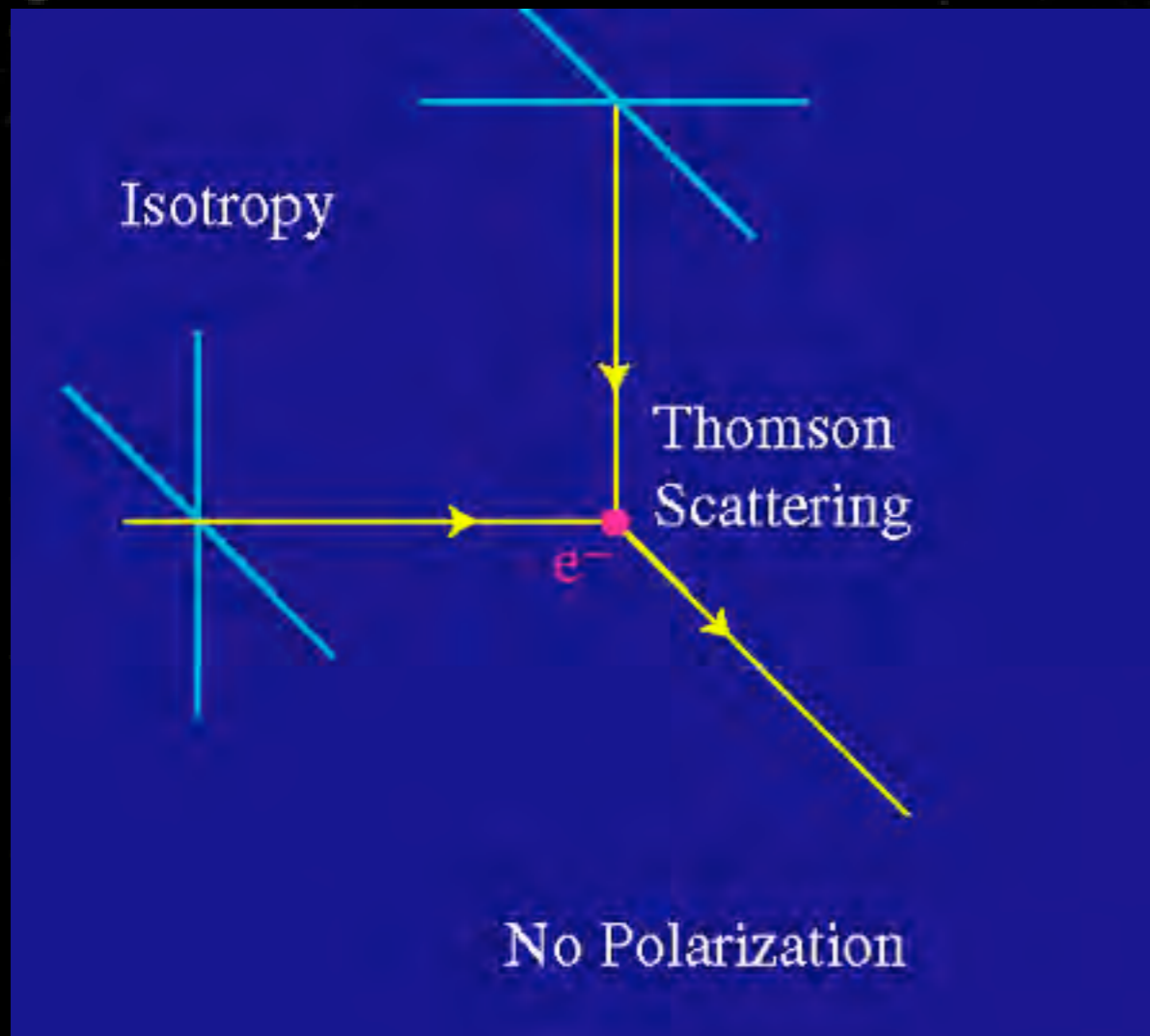
N. Ponthieu

Précieuses informations complémentaires !!!

$$C_l^{TT}, C_l^{TE}, C_l^{EE}, C_l^{BB}$$



Le CMB est polarisé (10%) !



W. Hu

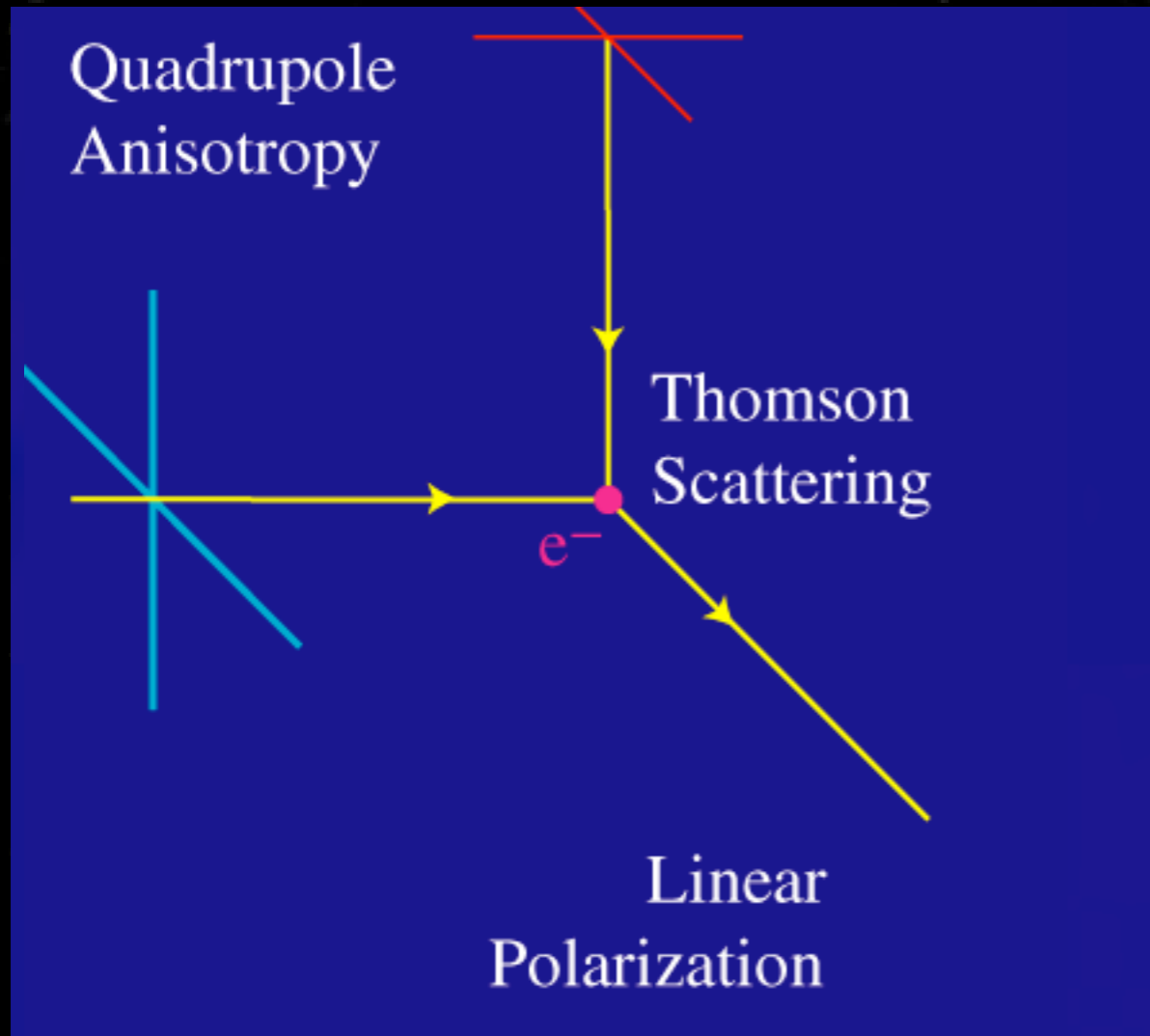
N. Ponthieu

Précieuses informations complémentaires !!!

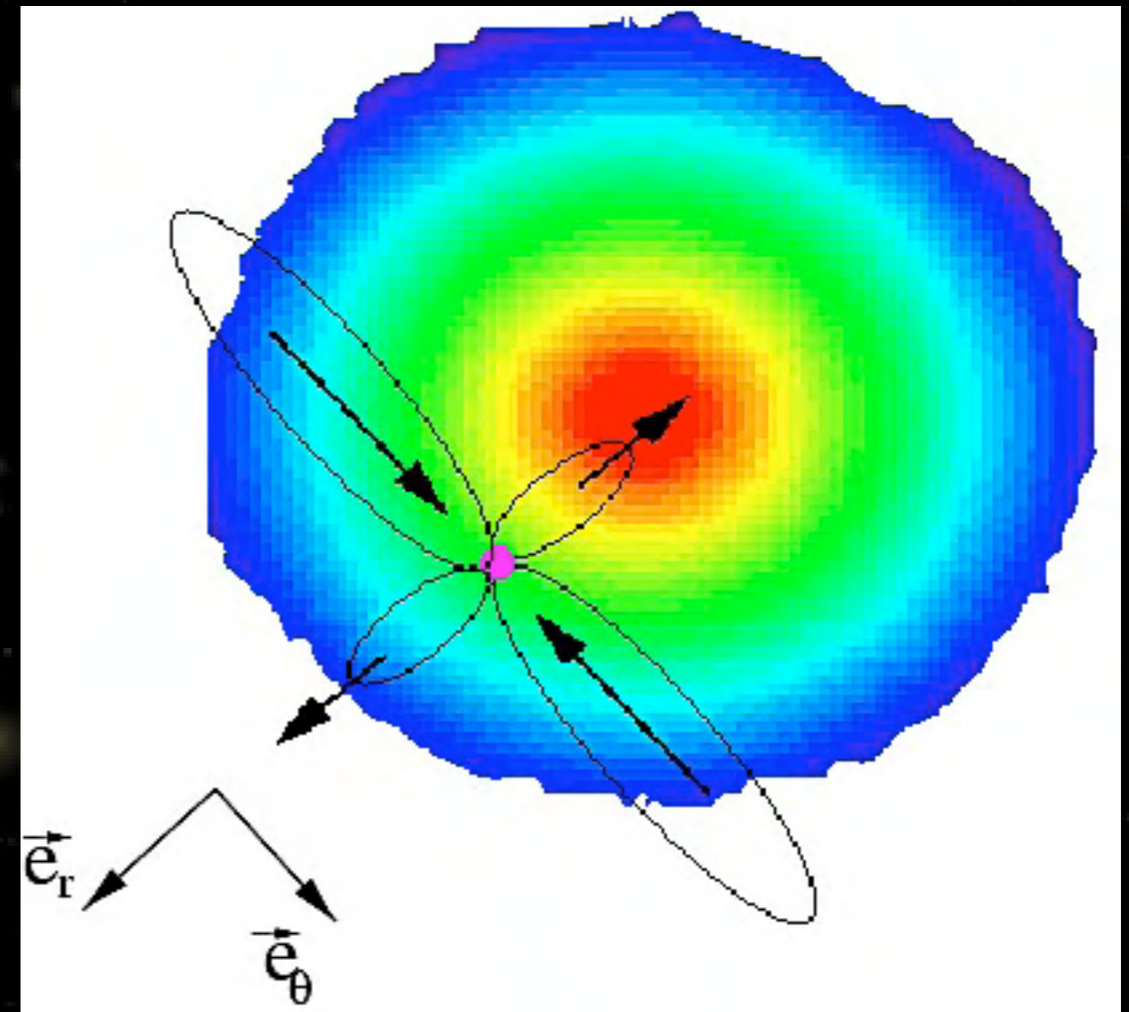
$$C_l^{TT}, C_l^{TE}, C_l^{EE}, C_l^{BB}$$



Le CMB est polarisé (10%) !



W. Hu



N. Ponthieu

Précieuses informations complémentaires !!!

$$C_l^{TT}, C_l^{TE}, C_l^{EE}, C_l^{BB}$$



Caractérisation de la polarisation

- Paramètres de Stokes :

$$I(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle + \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{scalaire})$$

$$Q(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle - \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$U(\vec{n}) = \langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle + \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$V(\vec{n}) = i \left(\langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle - \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \right) \quad (\text{spin } 2)$$



- Décomposition en harmoniques sphériques de spin +/- 2

$$Q(\vec{n}) + iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{2,\ell m} {}_2Y_{\ell m}(\vec{n})$$

$$Q(\vec{n}) - iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{-2,\ell m} {}_{-2}Y_{\ell m}(\vec{n})$$

- Tout champ de polarisation peut être décomposé en 2 champs scalaires E et B

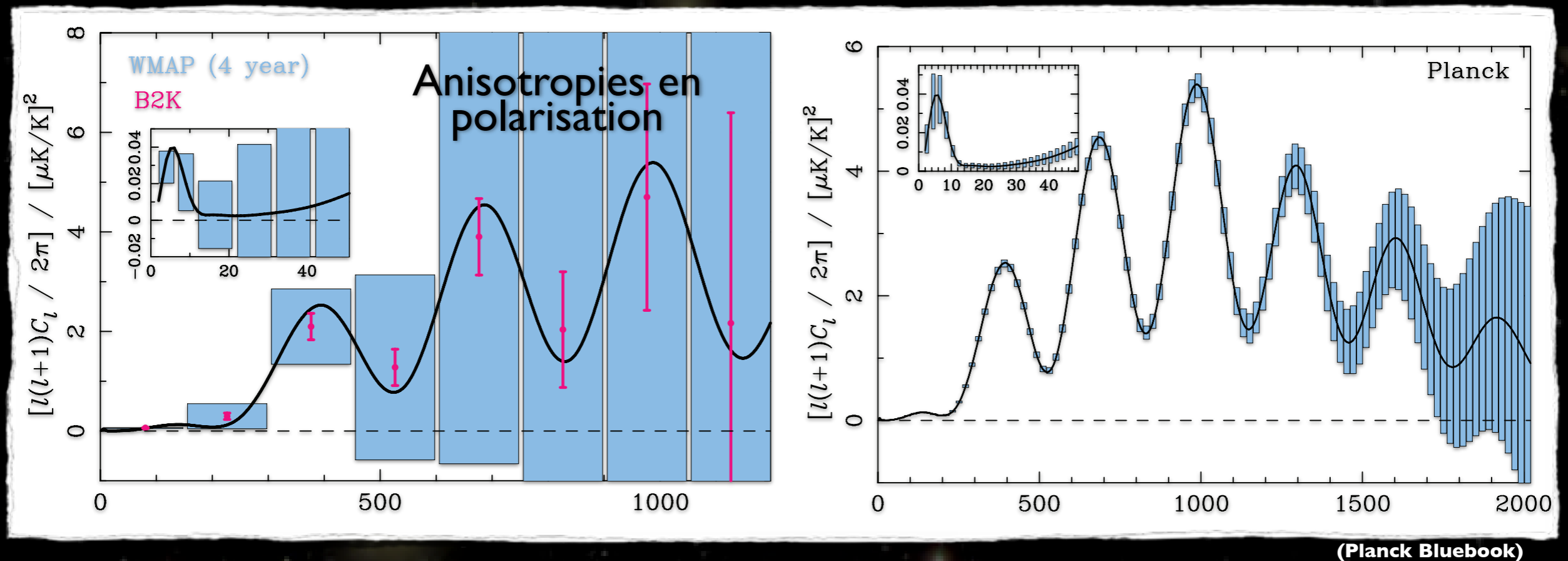
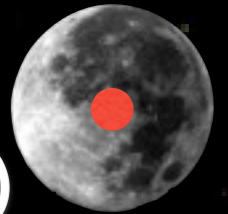
$$a_{E,\ell m} = -\frac{a_{2,\ell m} + a_{-2,\ell m}}{2} \quad (\text{pair})$$

$$a_{B,\ell m} = i\frac{a_{2,\ell m} - a_{-2,\ell m}}{2} \quad (\text{impair})$$



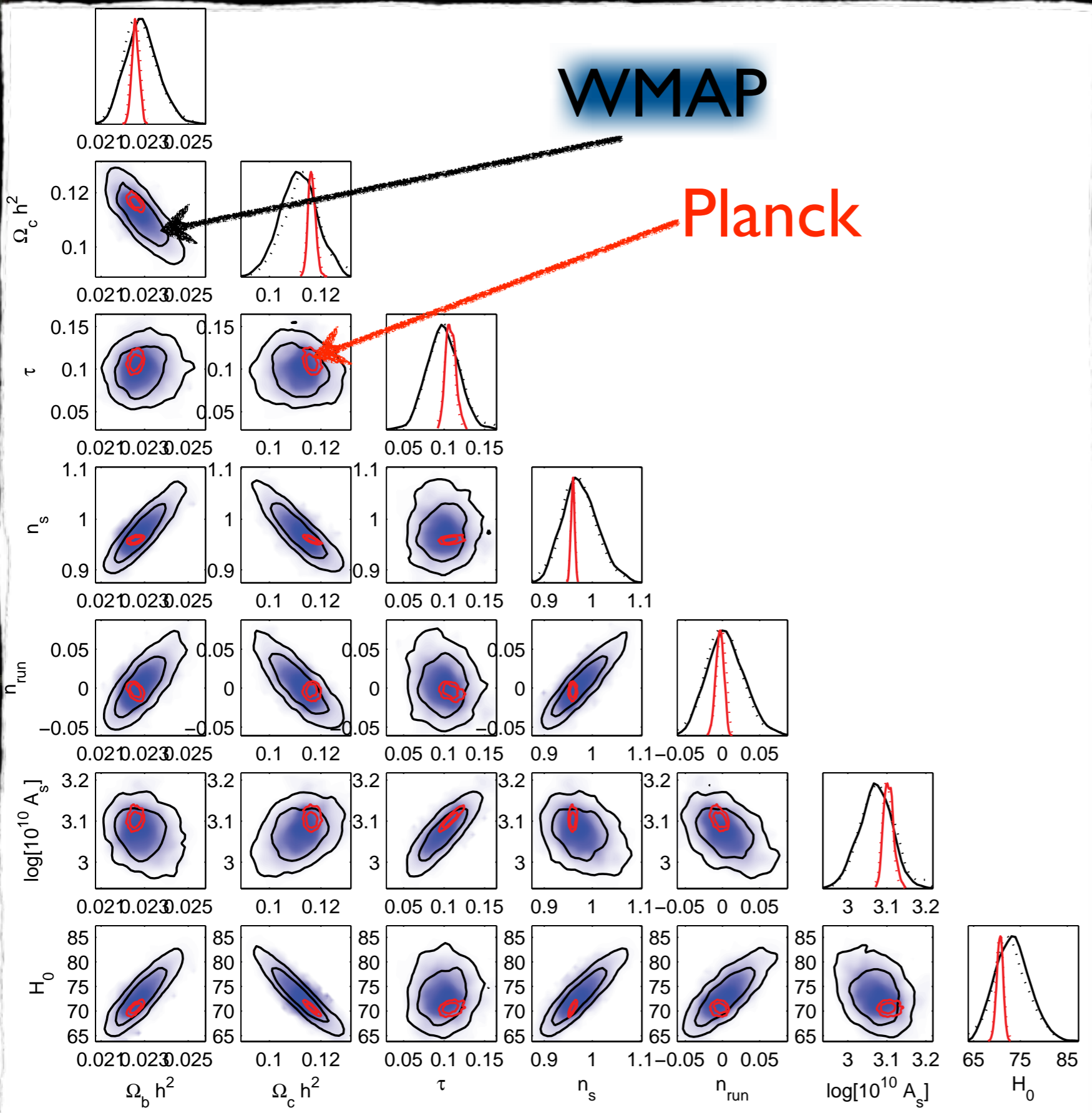
Ce que l'on saura après Planck

- Résolution angulaire : 5 arcminutes (1/6 de la lune)
- Sensibilité : 5 mK / pixel de résolution (0.0002 % sur 2.73 K)
- Gain d'un facteur 3-10 sur les paramètres cosmologiques



Ce que l'on saura après Planck

(Planck Bluebook)



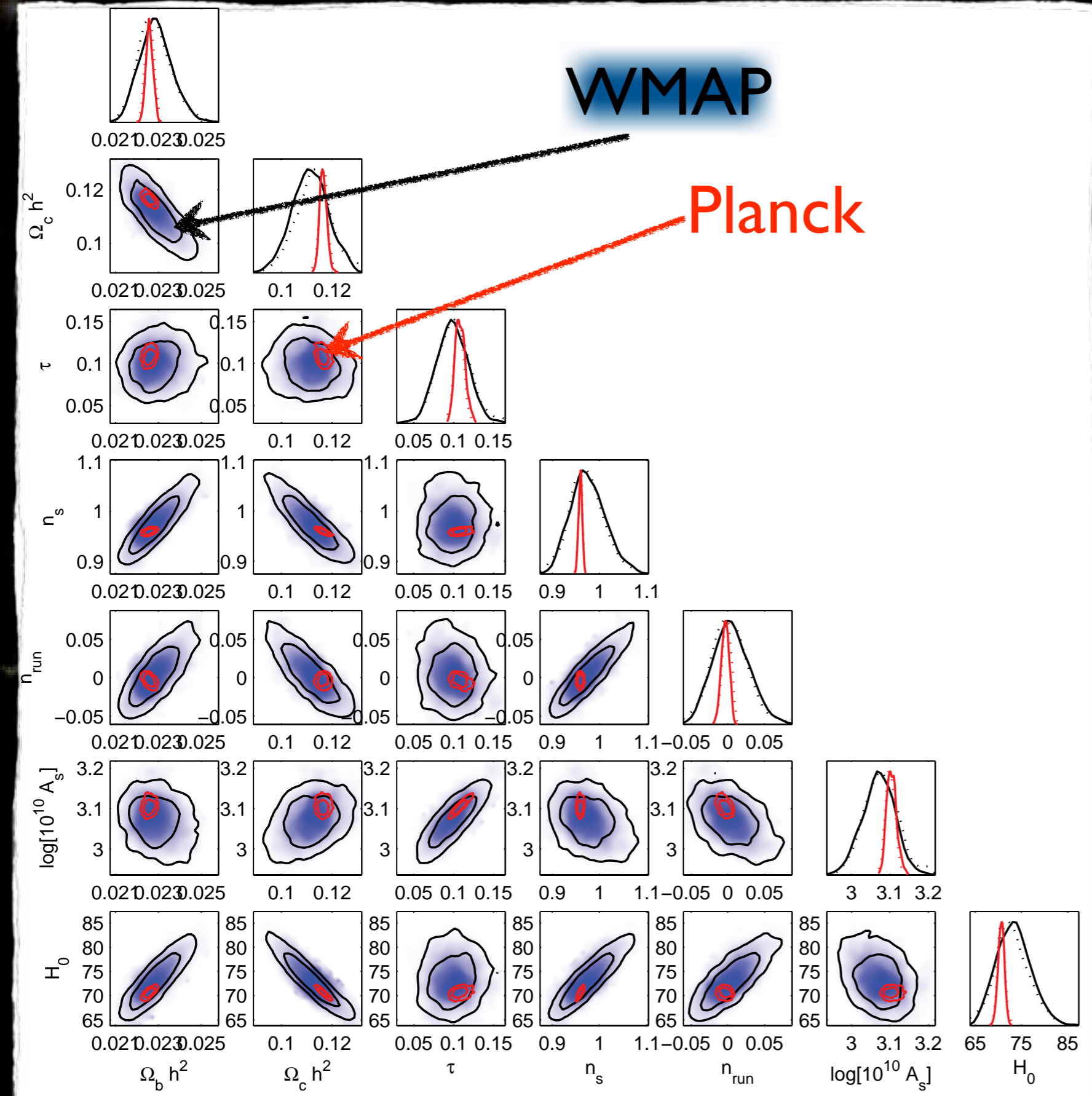
Qu'y a-t-il au delà ?

Cela vaut-il le coup d'aller plus loin ?



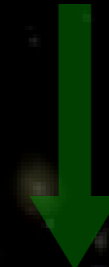
Ce que l'on saura après Planck

(Planck Bluebook)



Qu'y a-t-il au delà ?

Cela vaut-il le coup d'aller plus loin ?

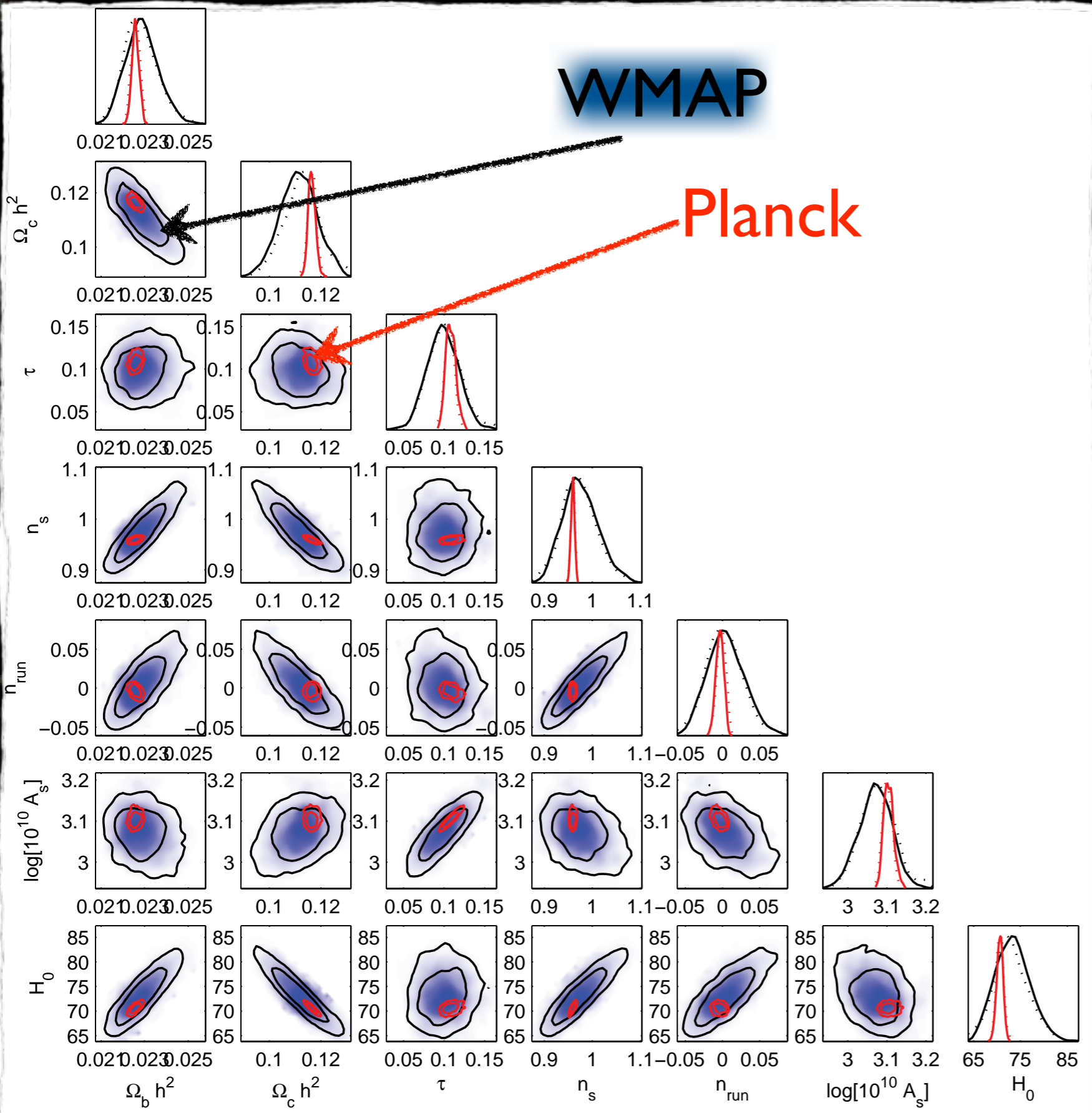


D'où viennent les formes de spectre de CI que l'on ajuste sur les données ?



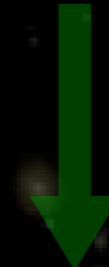
Ce que l'on saura après Planck

(Planck Bluebook)



Qu'y a-t-il au delà ?

Cela vaut-il le coup d'aller plus loin ?



D'où viennent les formes de spectre de CI que l'on ajuste sur les données ?



Inflation !



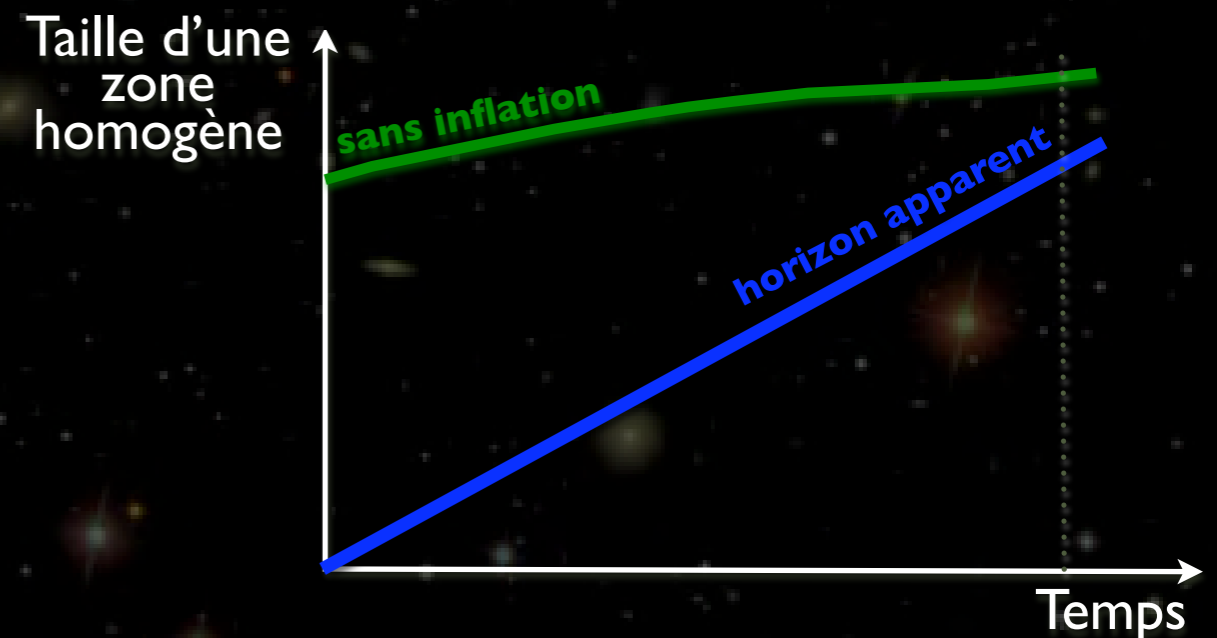
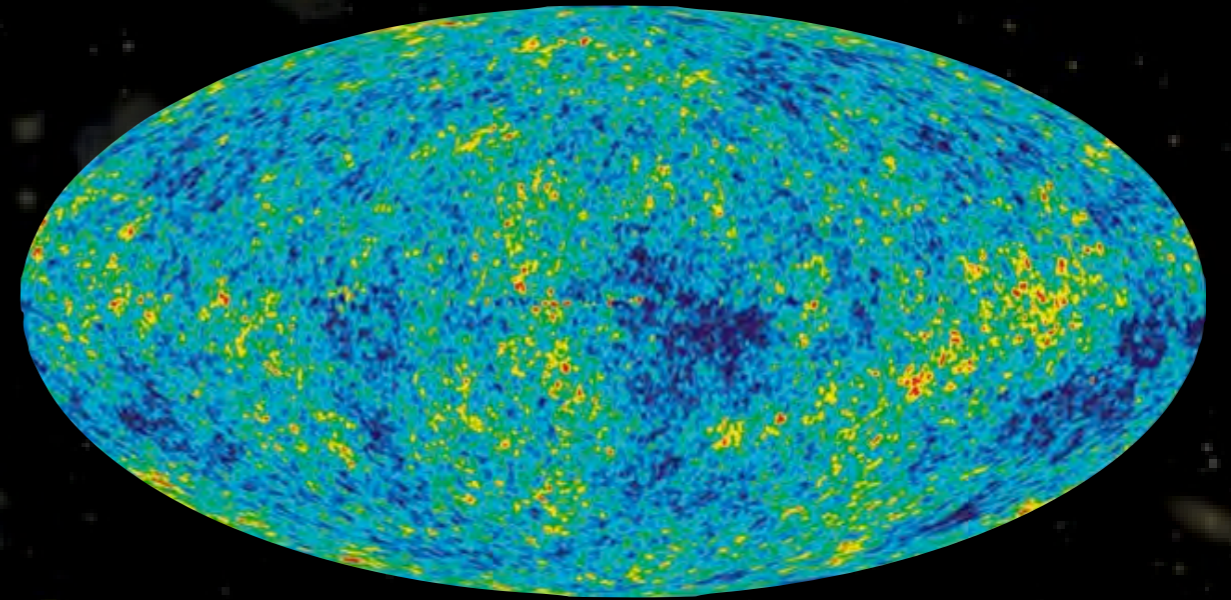
L'inflation

- Expansion accélérée aux premiers instants de l'Univers.
- Résout des paradoxes connus du modèle du Big-Bang
 - Horizon
 - Platitude
- Prédit la forme des fluctuations de densité primordiales
 - Graines pour la formation des structures
 - Gaussianité
 - présence de modes scalaires et tenseurs



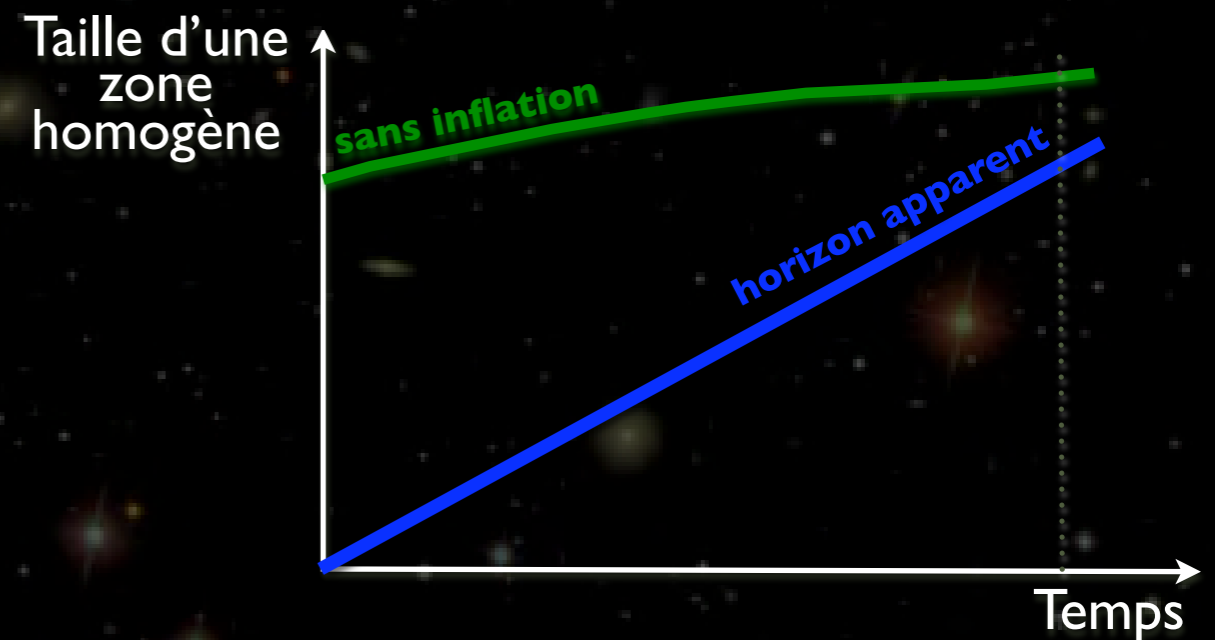
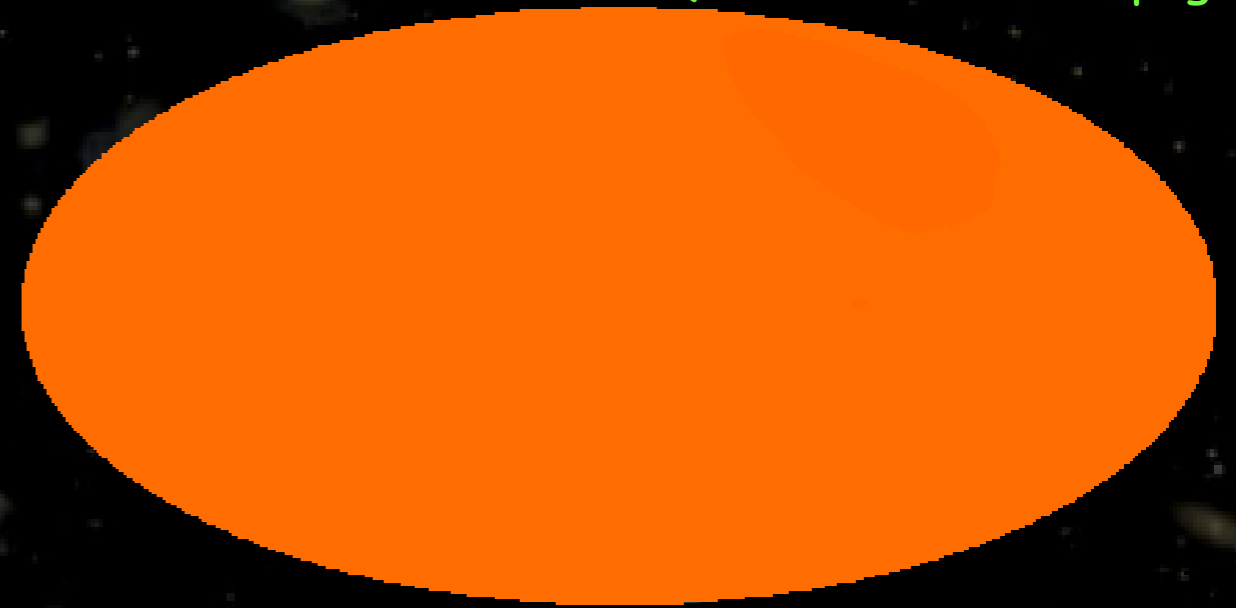
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



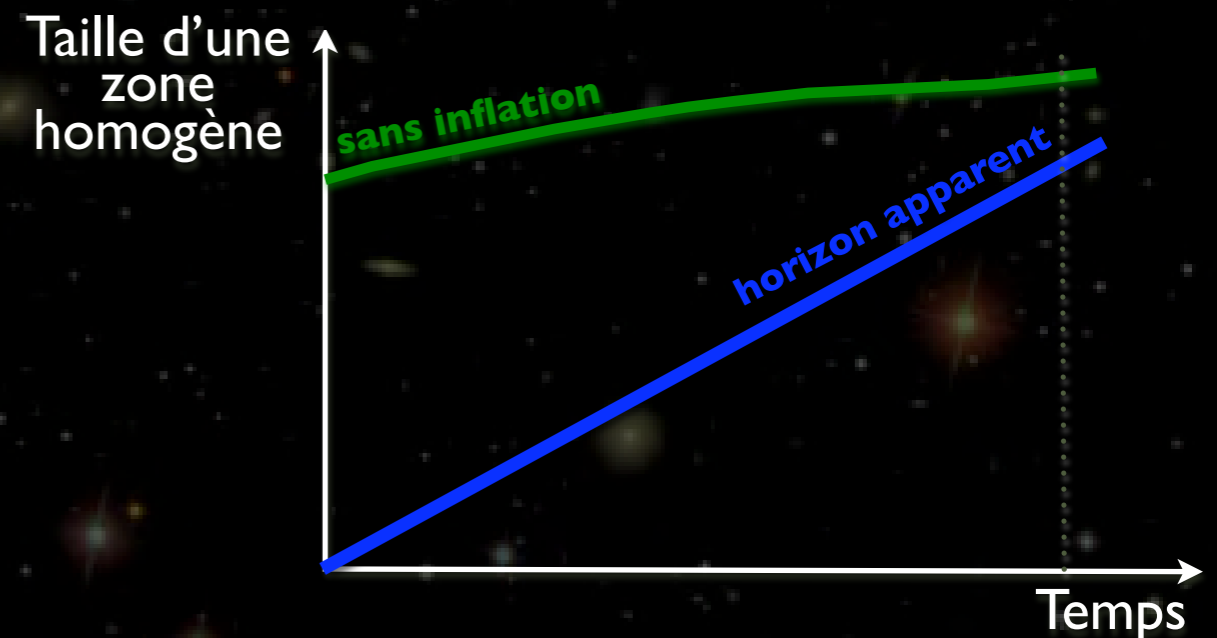
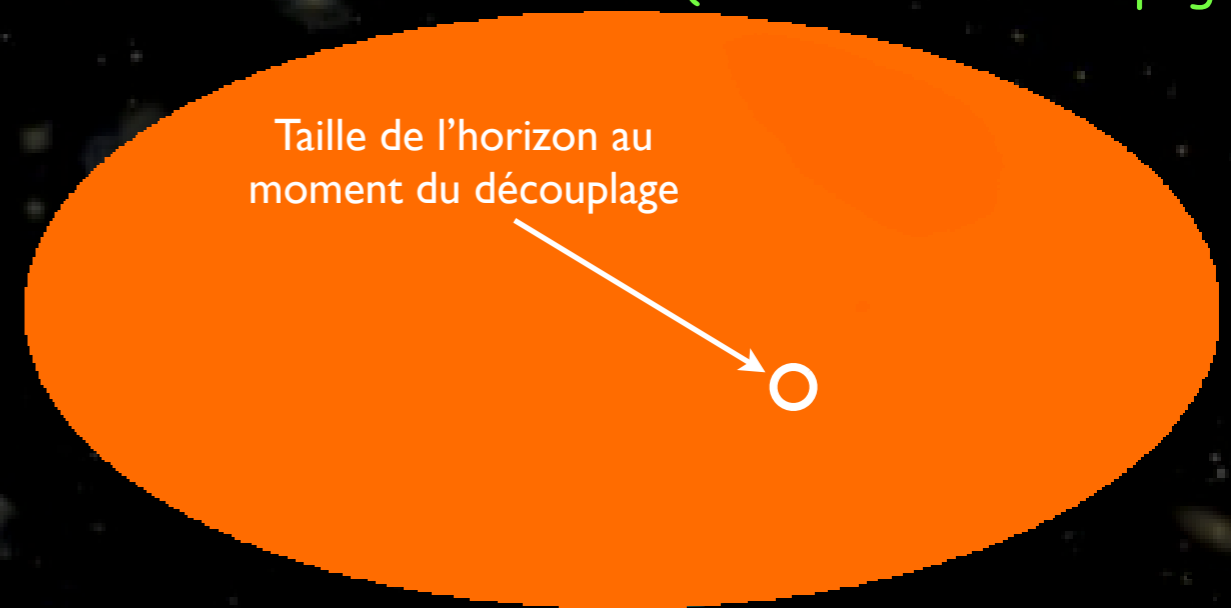
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



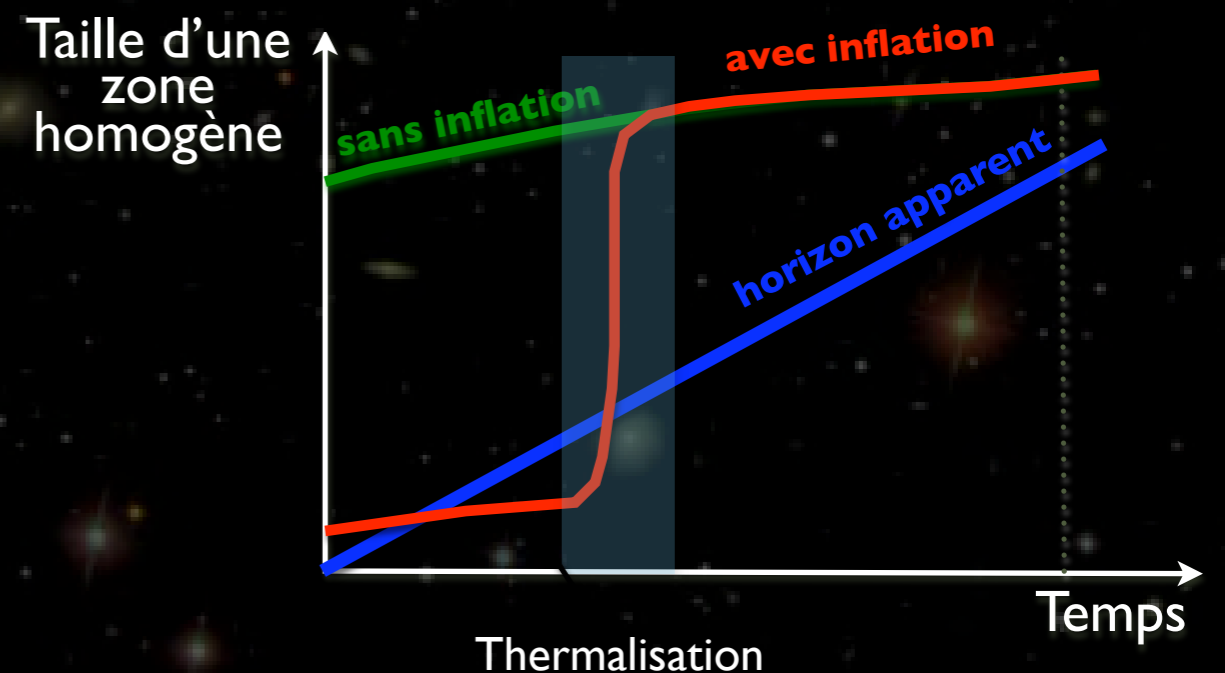
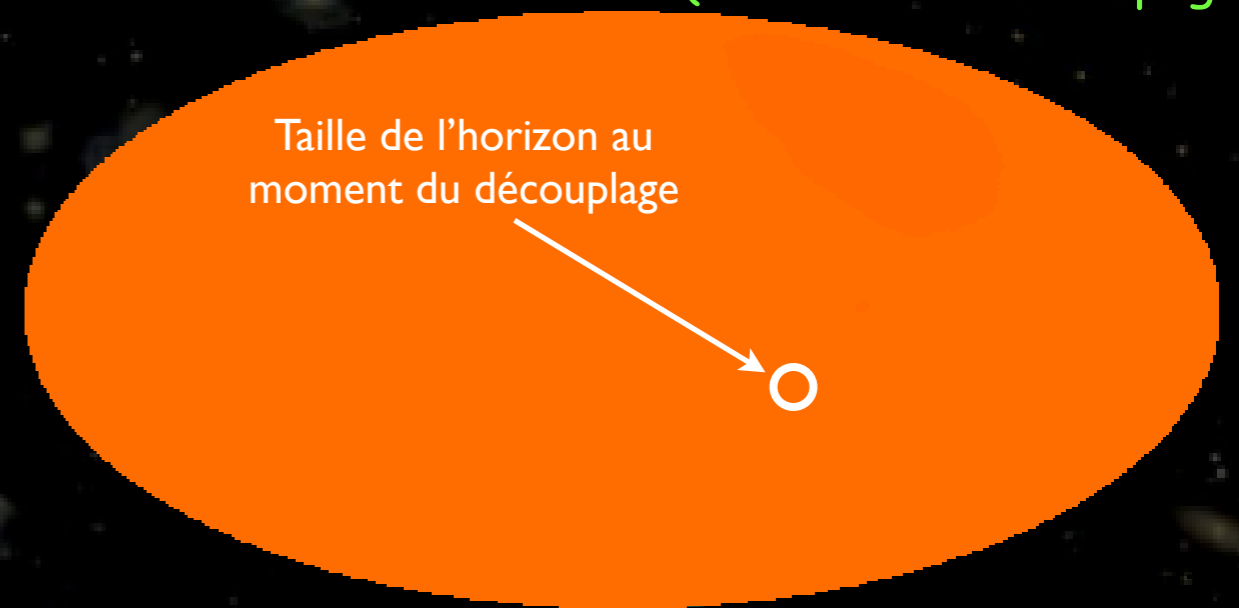
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



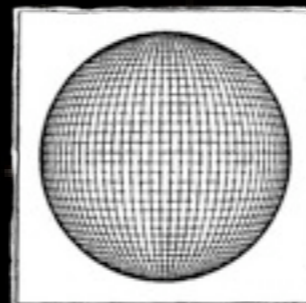
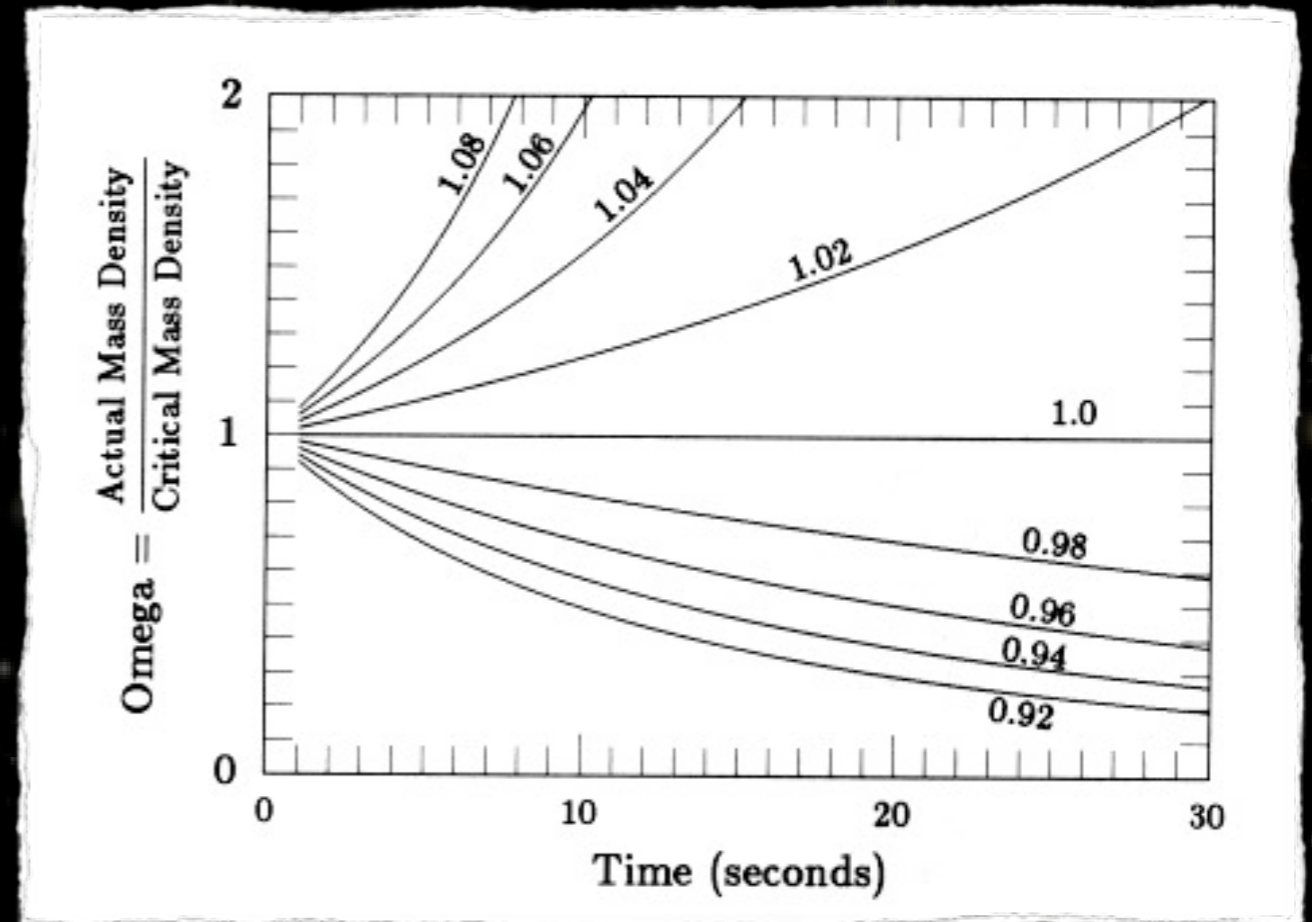
Problème de la platitude

- $\Omega_{\text{tot}}=1$ est «instable»
 - le moindre écart à la platitude à $t=0$ se traduirait aujourd'hui par un écart considérable
 - or on mesure $\Omega_{\text{tot}}=1$ avec 1% de précision !

\Rightarrow à $t=10^{-43}$ sec : $|\Omega_{\text{tot}}-1| < 10^{-60}$

- Il faut un processus pour «aplatir» l'Univers

- **Solution : Inflation**



A. Guth



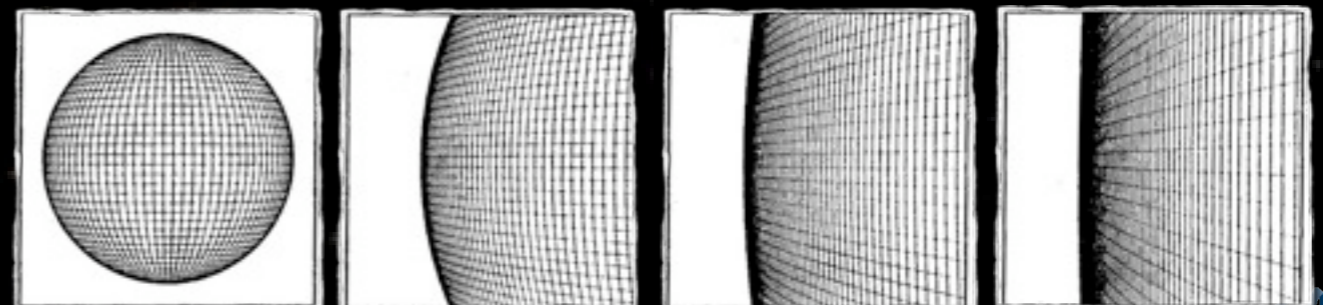
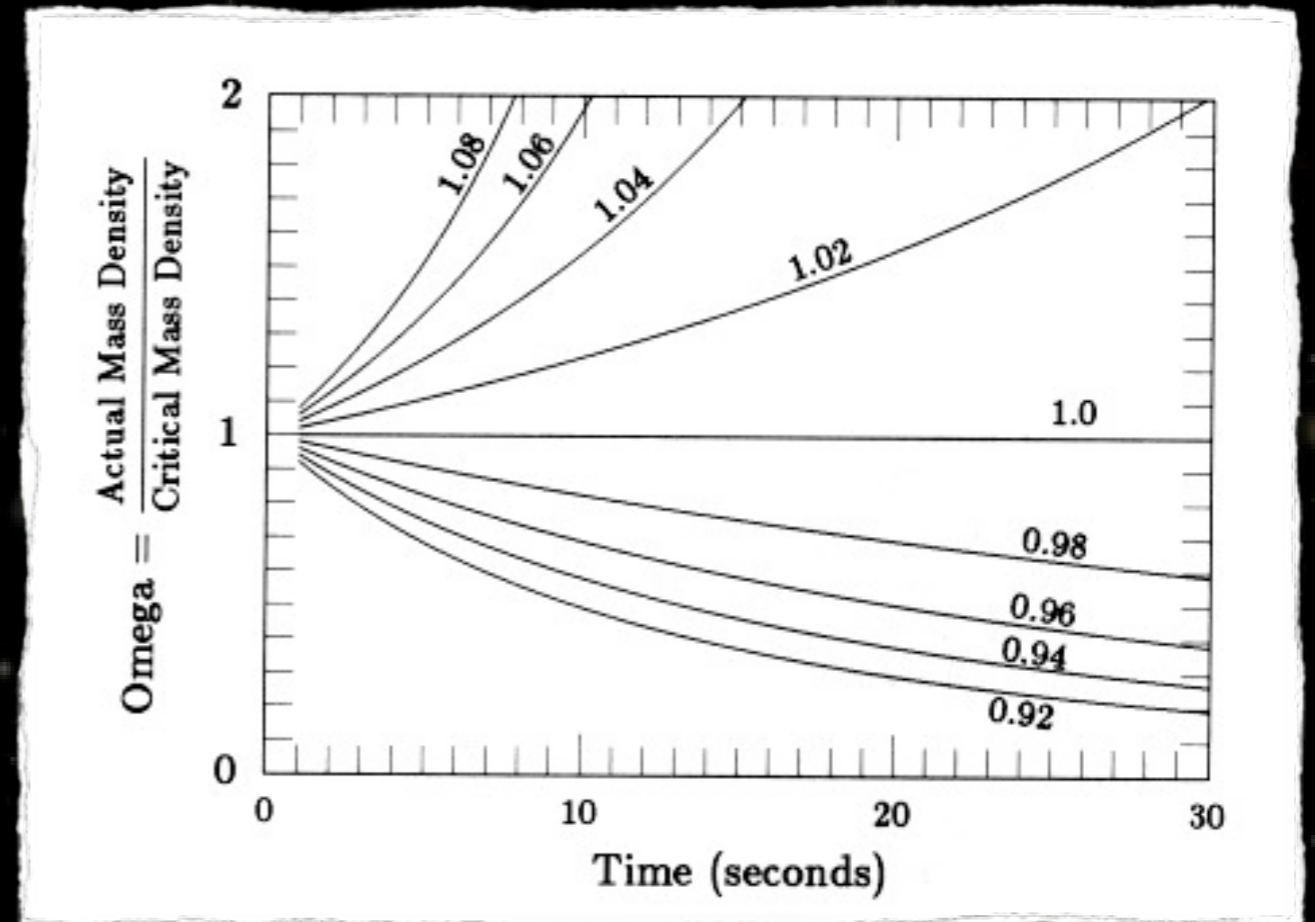
Problème de la platitude

- $\Omega_{\text{tot}}=1$ est «instable»
 - le moindre écart à la platitude à $t=0$ se traduirait aujourd'hui par un écart considérable
 - or on mesure $\Omega_{\text{tot}}=1$ avec 1% de précision !

\Rightarrow à $t=10^{-43}$ sec : $|\Omega_{\text{tot}}-1| < 10^{-60}$

- Il faut un processus pour «aplatir» l'Univers

- **Solution : Inflation**

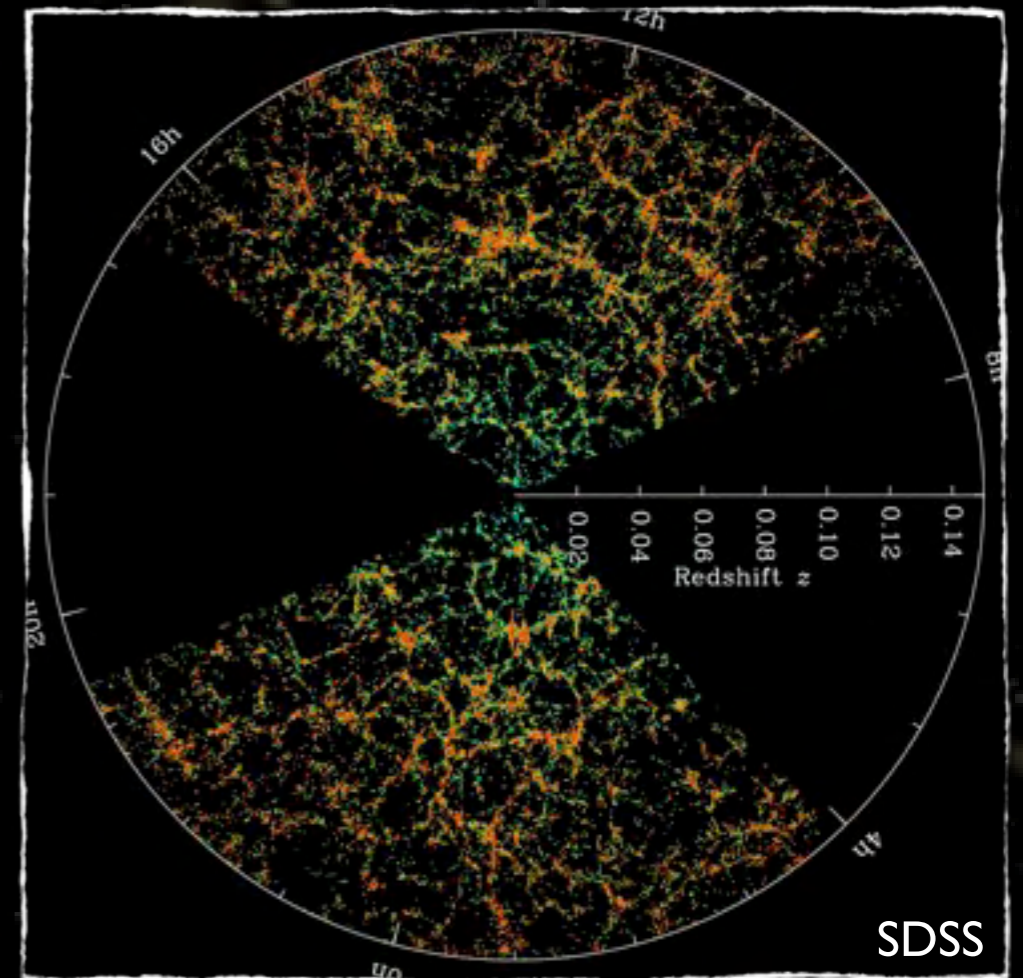


A. Guth



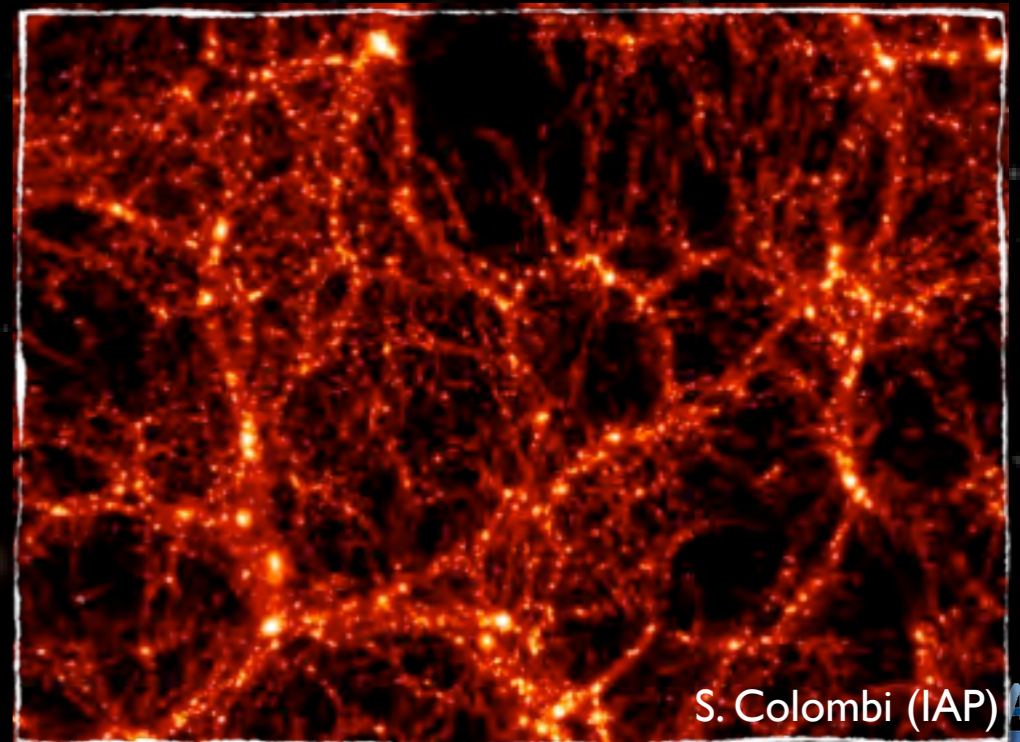
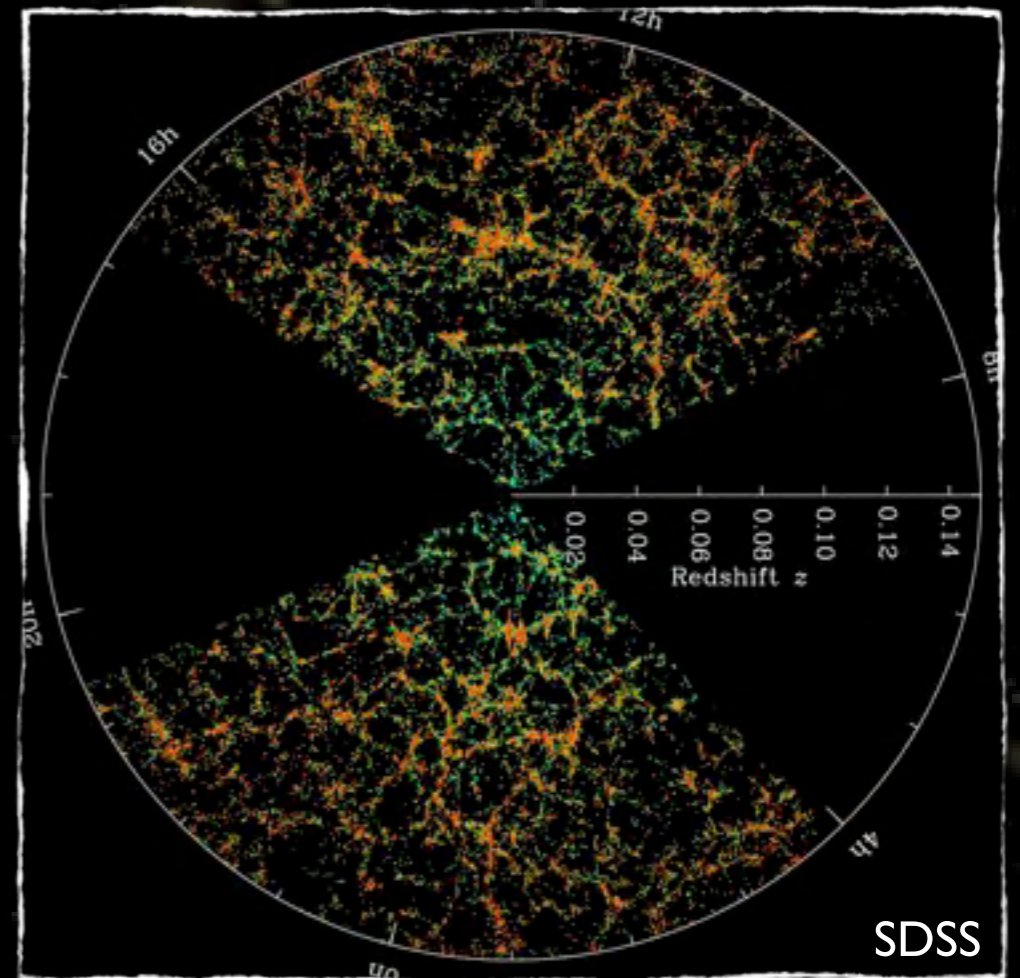
D'où viennent les structures ?

- On observe de nombreuses structures denses autour de nous (galaxies, amas, filaments)
- le Big-Bang «simple» n'explique pas leur origine
- si on «suppose» les graines alors on explique bien les structures
- Deux alternatives :
 - conditions initiales ad-hoc
 - processus permettant de les générer : **L'inflation**



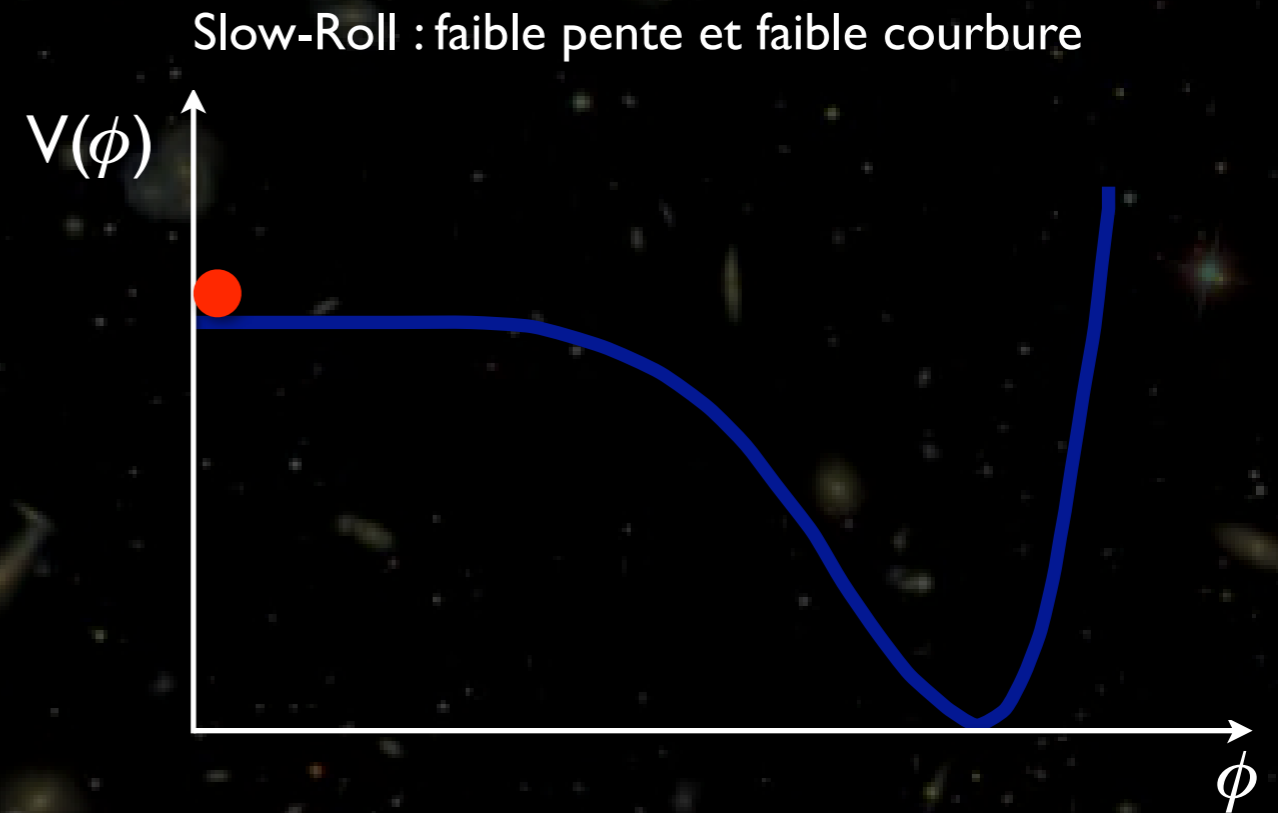
D'où viennent les structures ?

- On observe de nombreuses structures denses autour de nous (galaxies, amas, filaments)
- le Big-Bang «simple» n'explique pas leur origine
- si on «suppose» les graines alors on explique bien les structures
- Deux alternatives :
 - conditions initiales ad-hoc
 - processus permettant de les générer : **L'inflation**



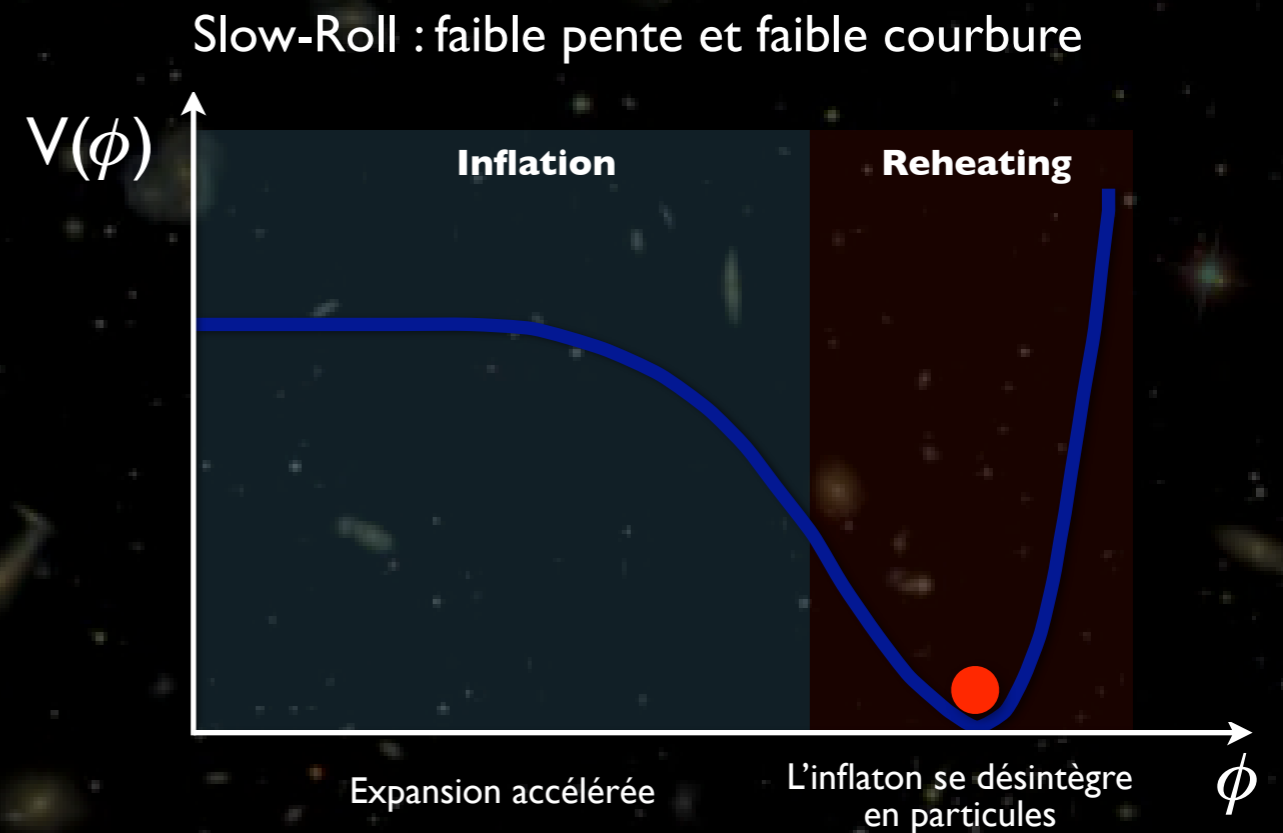
La Phase d'inflation

- Un champ scalaire, l'inflaton, domine l'Univers primordial
- Potentiel de slow-roll
⇒ expansion accélérée ⇔ inflation
- L'inflation s'arrête quand le champ approche de son minimum
⇒ Reheating : production de particules
- L'univers suit alors une évolution classique



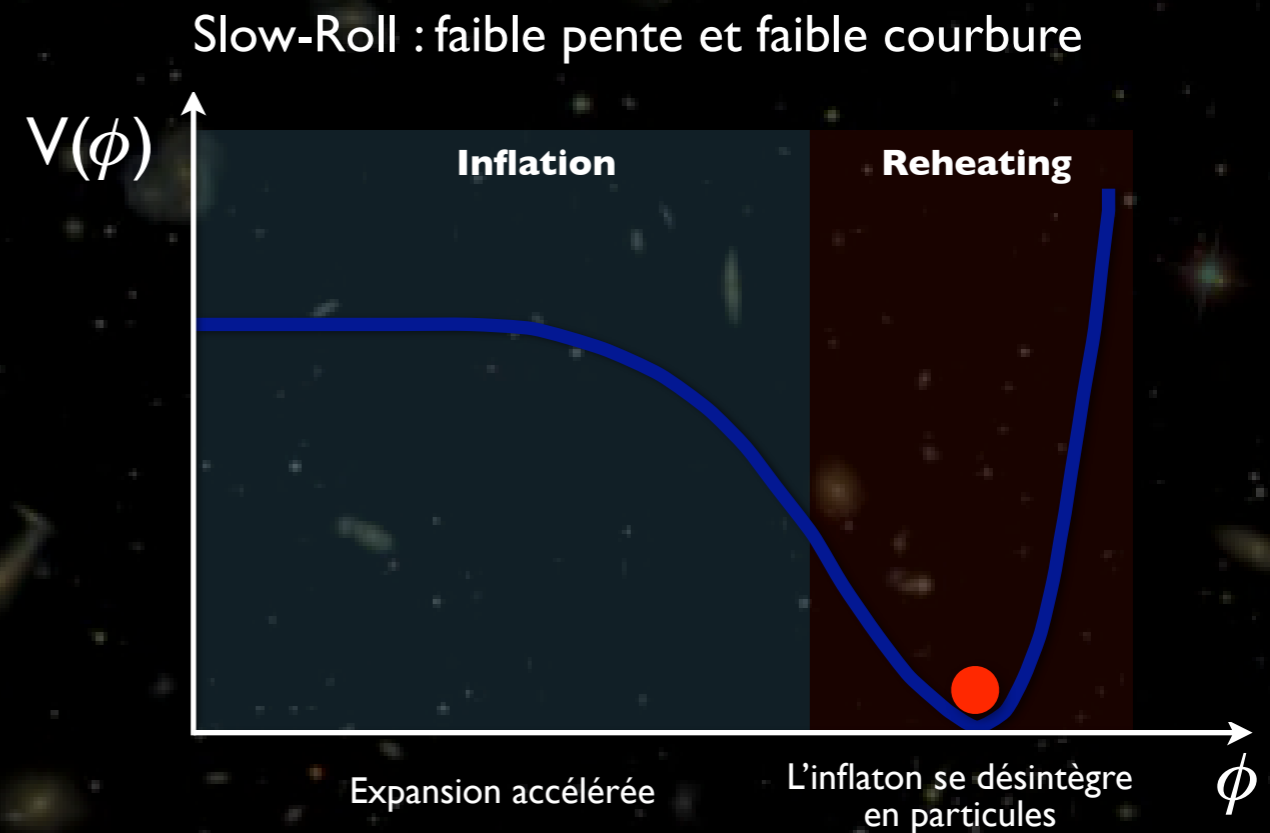
La Phase d'inflation

- Un champ scalaire, l'inflaton, domine l'Univers primordial
- Potentiel de slow-roll
⇒ expansion accélérée ⇔ inflation
- L'inflation s'arrête quand le champ approche de son minimum
⇒ Reheating : production de particules
- L'univers suit alors une évolution classique



La Phase d'inflation

- Un champ scalaire, l'inflaton, domine l'Univers primordial
- Potentiel de slow-roll
⇒ expansion accélérée ⇔ inflation
- L'inflation s'arrête quand le champ approche de son minimum
⇒ Reheating : production de particules
- L'univers suit alors une évolution classique



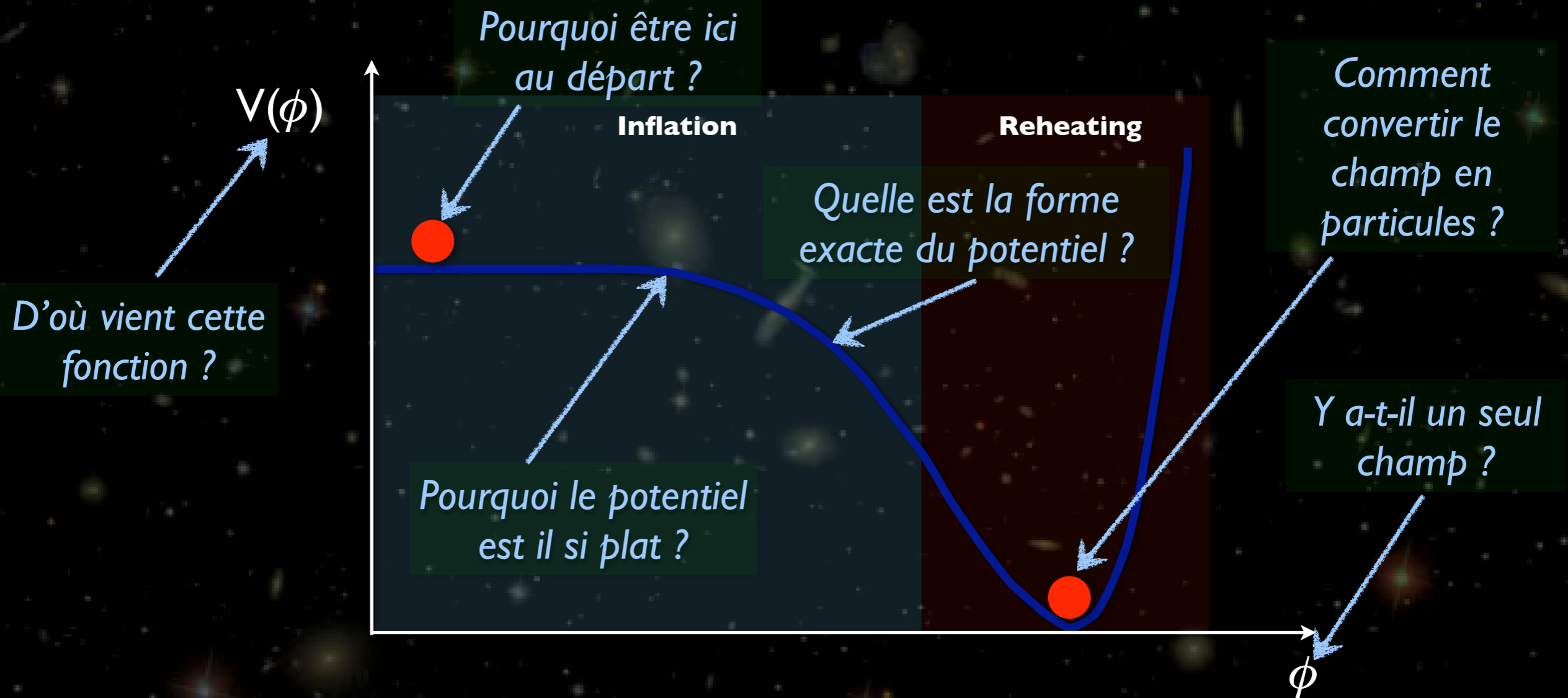
les fluctuations quantiques du potentiel de l'inflaton sont «grossies» par l'inflation et donnent des fluctuations macroscopiques dont on peut prédire la forme

⇒ graines pour la formation des structures

- modes scalaires et tenseurs
- spectre presque invariant d'échelle
- fluctuations presque gaussiennes



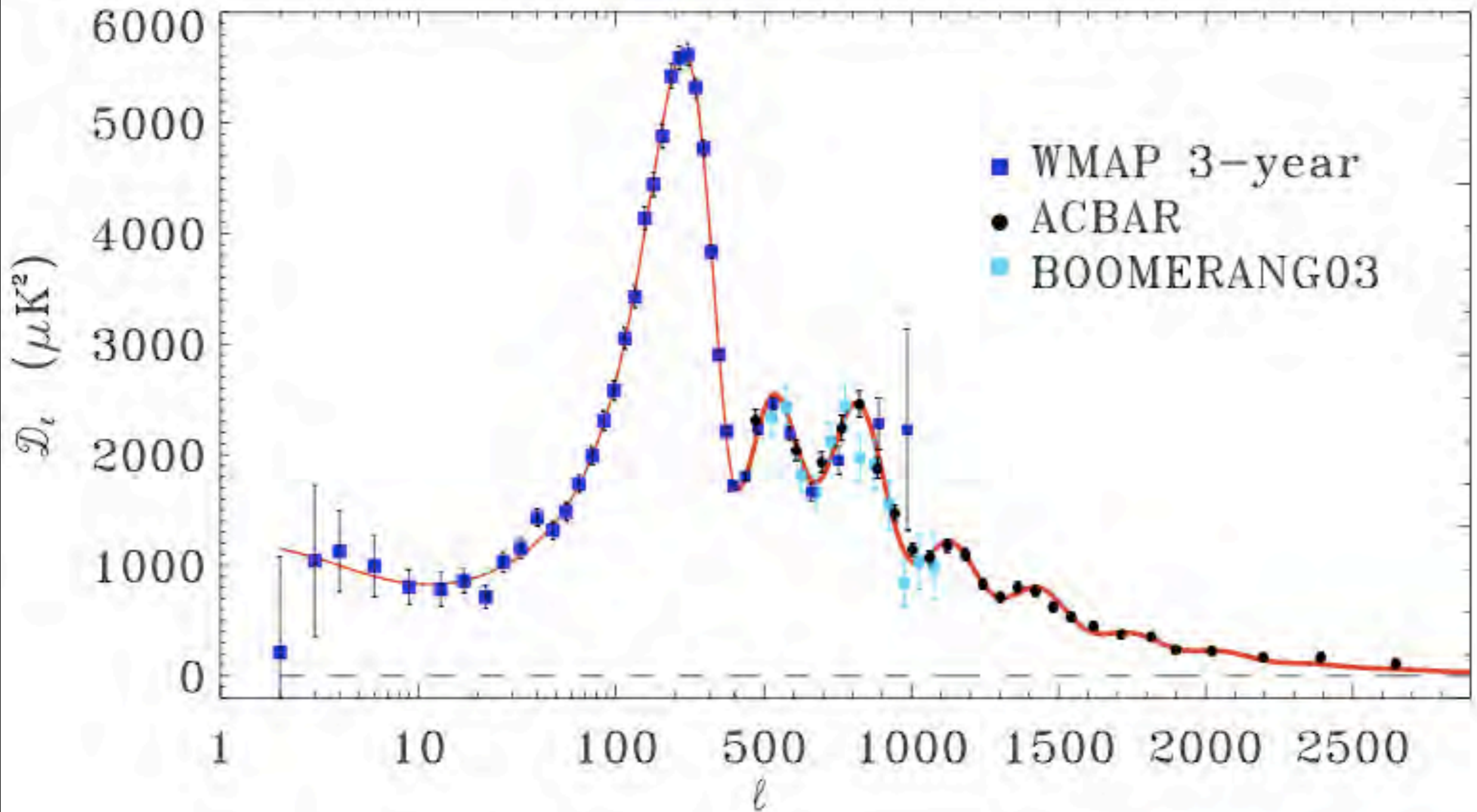
Beaucoup de questions



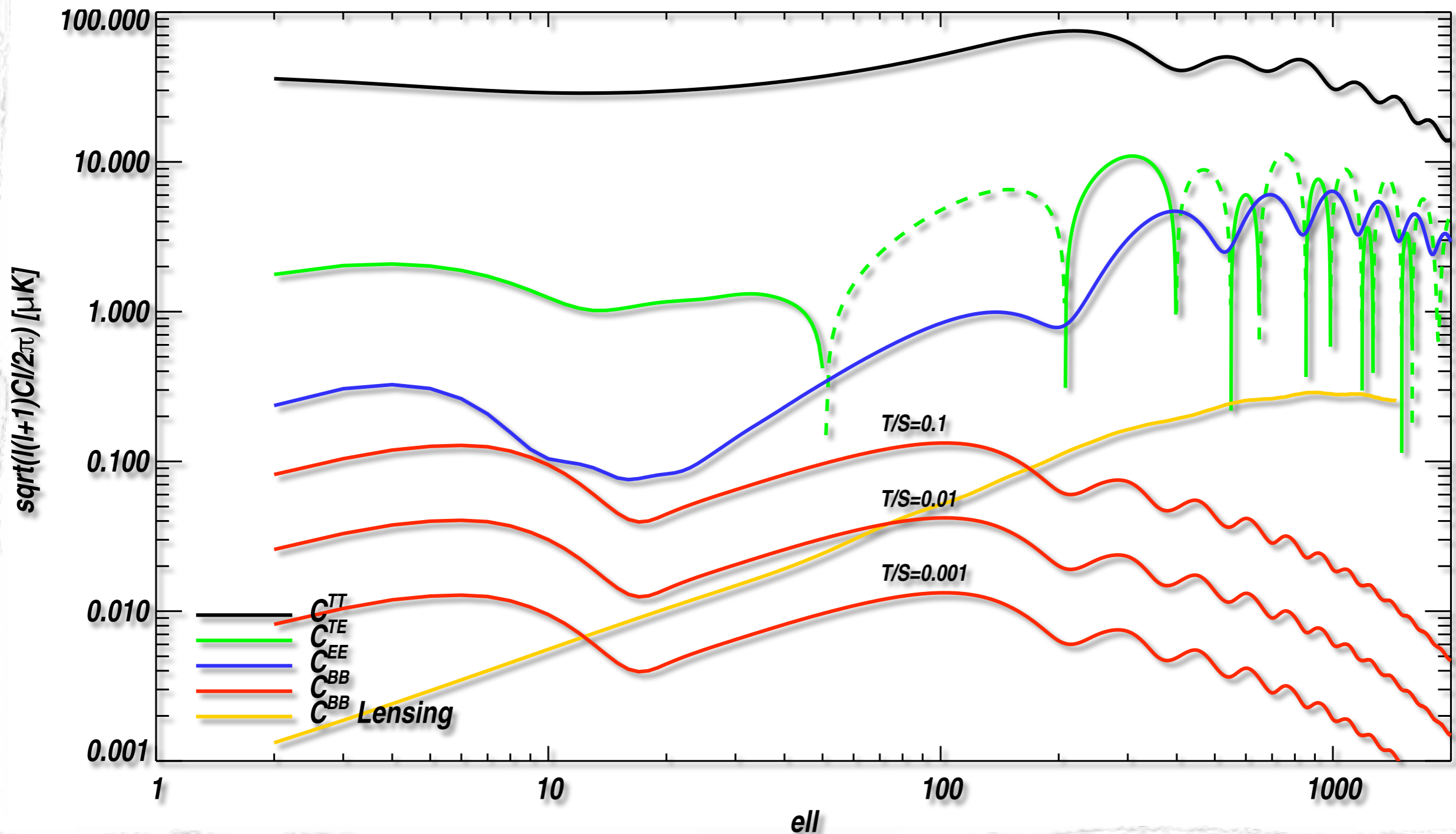
Le CMB (température et polarisation) contient des réponses à ces questions fondamentales mais actuellement, presque tous les modèles d'inflation sont compatibles avec les données



Inflation Vs. Données

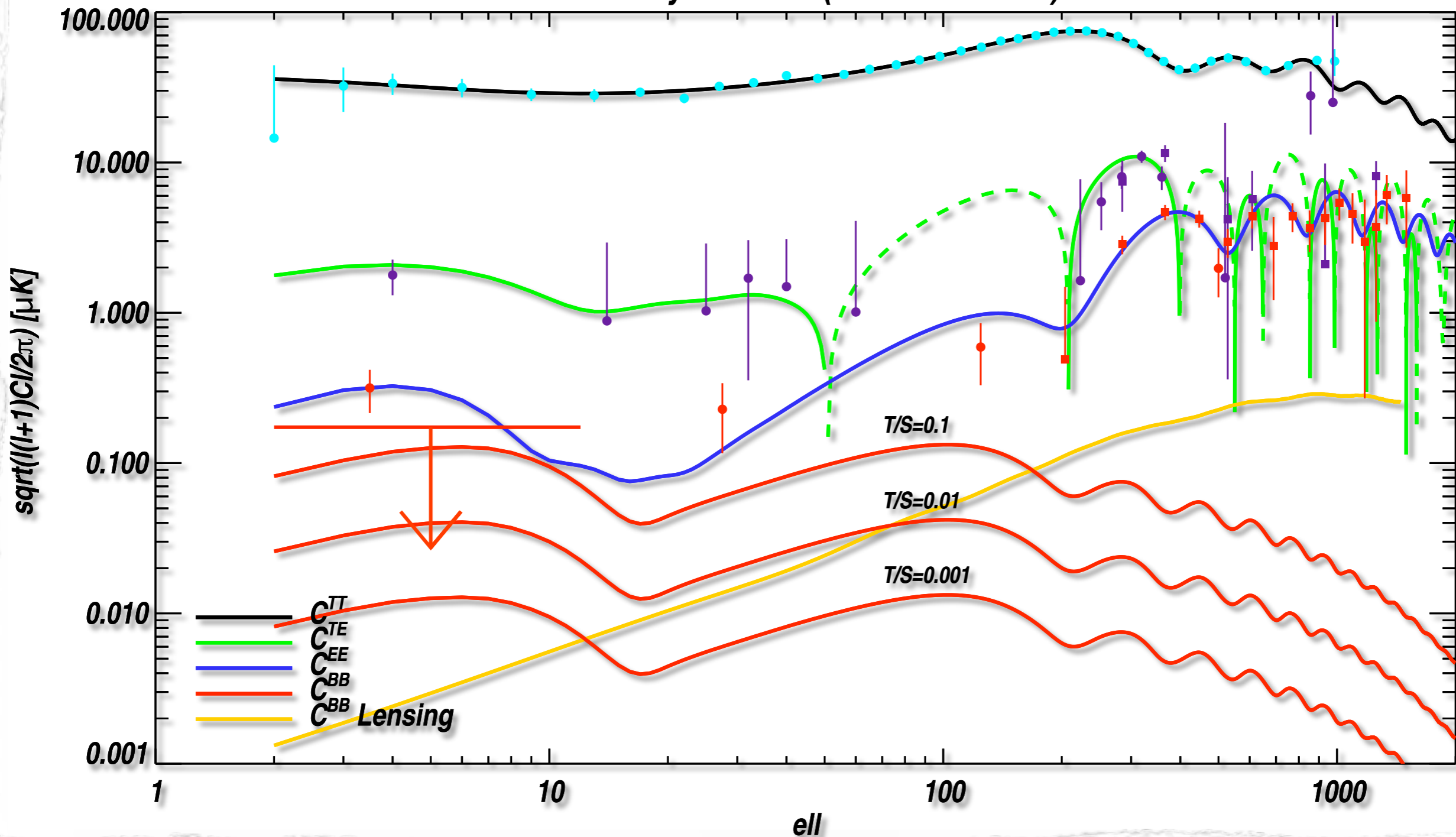


Inflation Vs. Données

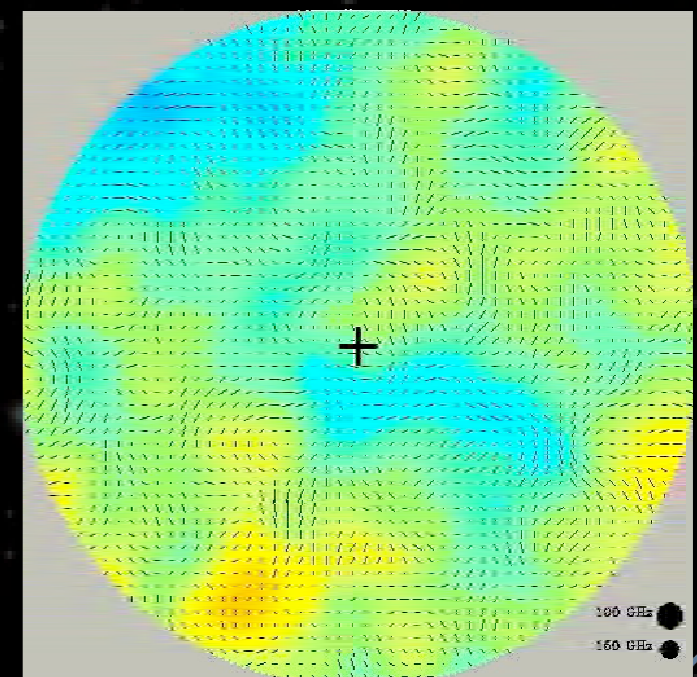
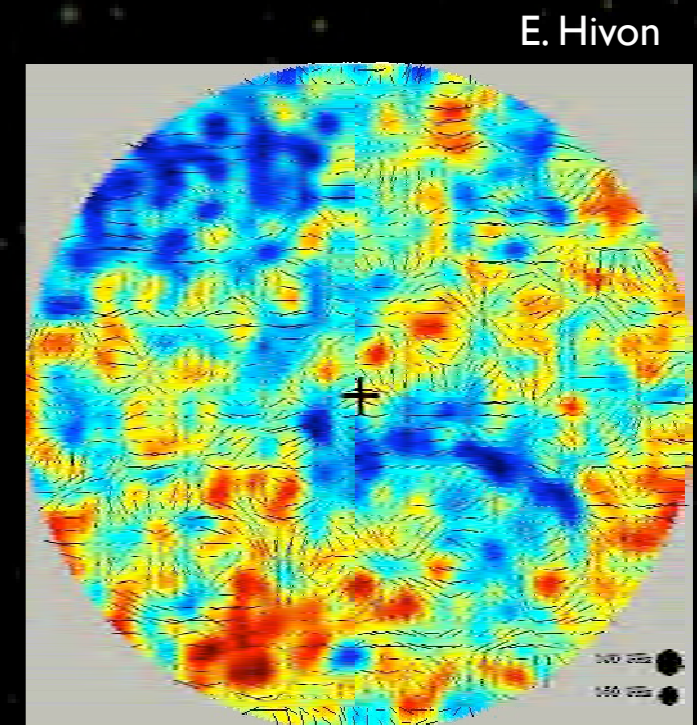
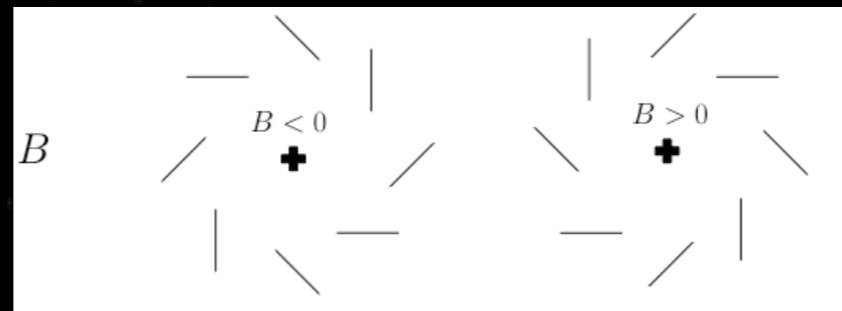
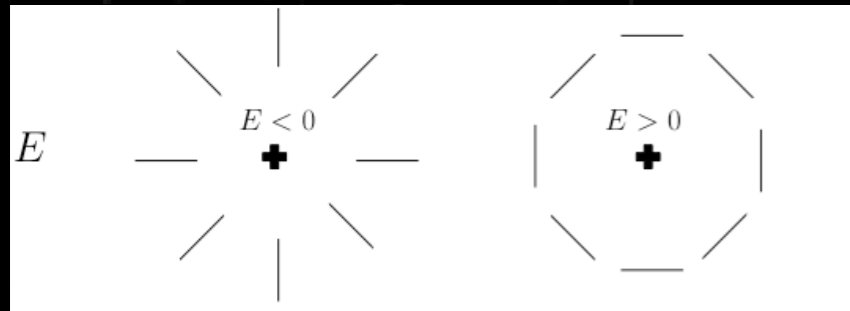


Inflation Vs. Données

WMAP3y + QUAD (Ade et al. 2007)



Prédiction de l'inflation : MODES Scalaires & tenseurs Polarisation E & B



- Perturbations scalaires

- Fluctuations de densité
 - Température
 - Polarisation E
 - Pas de Polarisation B

$$\sigma_{scal}^T \simeq 100\mu\text{K}$$

$$\sigma_{scal}^E \simeq 4\mu\text{K}$$

- Perturbations tensorielles

- Ondes gravitationnelles primordiales
 - Température
 - Polarisation E
 - Polarisation B

$$\sigma_{tens}^T \leq 30\mu\text{K}$$

$$\sigma_{tens}^E \leq 1\mu\text{K}$$

$$\sigma_{tens}^B \leq 0.3\mu\text{K}$$

Seuls les modes Tenseurs produisent de la polarisation B



Prouver l'inflation ?

- les modes tenseurs sont une prédiction spécifique de l'inflation

$$P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1} \quad P_r(k) = A_t \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_t} \quad r = \frac{P_t(k_0)}{P_s(k_0)}$$

rapport entre
modes B et E

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \text{ GeV} \left(\frac{r_{\text{CMB}}}{0.01} \right)^{1/4}$$



Prouver l'inflation ?

- les modes tenseurs sont une prédiction spécifique de l'inflation

$$P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1} \quad P_r(k) = A_t \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_t} \quad r = \frac{P_t(k_0)}{P_s(k_0)}$$

amplitude

rapport entre modes B et E

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \text{ GeV} \left(\frac{r_{\text{CMB}}}{0.01} \right)^{1/4}$$



Prouver l'inflation ?

- les modes tenseurs sont une prédiction spécifique de l'inflation

$$P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1} \quad P_r(k) = A_t \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_t}$$

amplitude forme du spectre

$$r = \frac{P_t(k_0)}{P_s(k_0)}$$

rapport entre modes B et E

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \text{ GeV} \left(\frac{r_{\text{CMB}}}{0.01} \right)^{1/4}$$



Prouver l'inflation ?

- les modes tenseurs sont une prédiction spécifique de l'inflation

$$P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1} \quad P_r(k) = A_t \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_t}$$

amplitude (pointing to A_s)

forme du spectre (pointing to $n_s - 1$ and n_t)

$$r = \frac{P_t(k_0)}{P_s(k_0)}$$

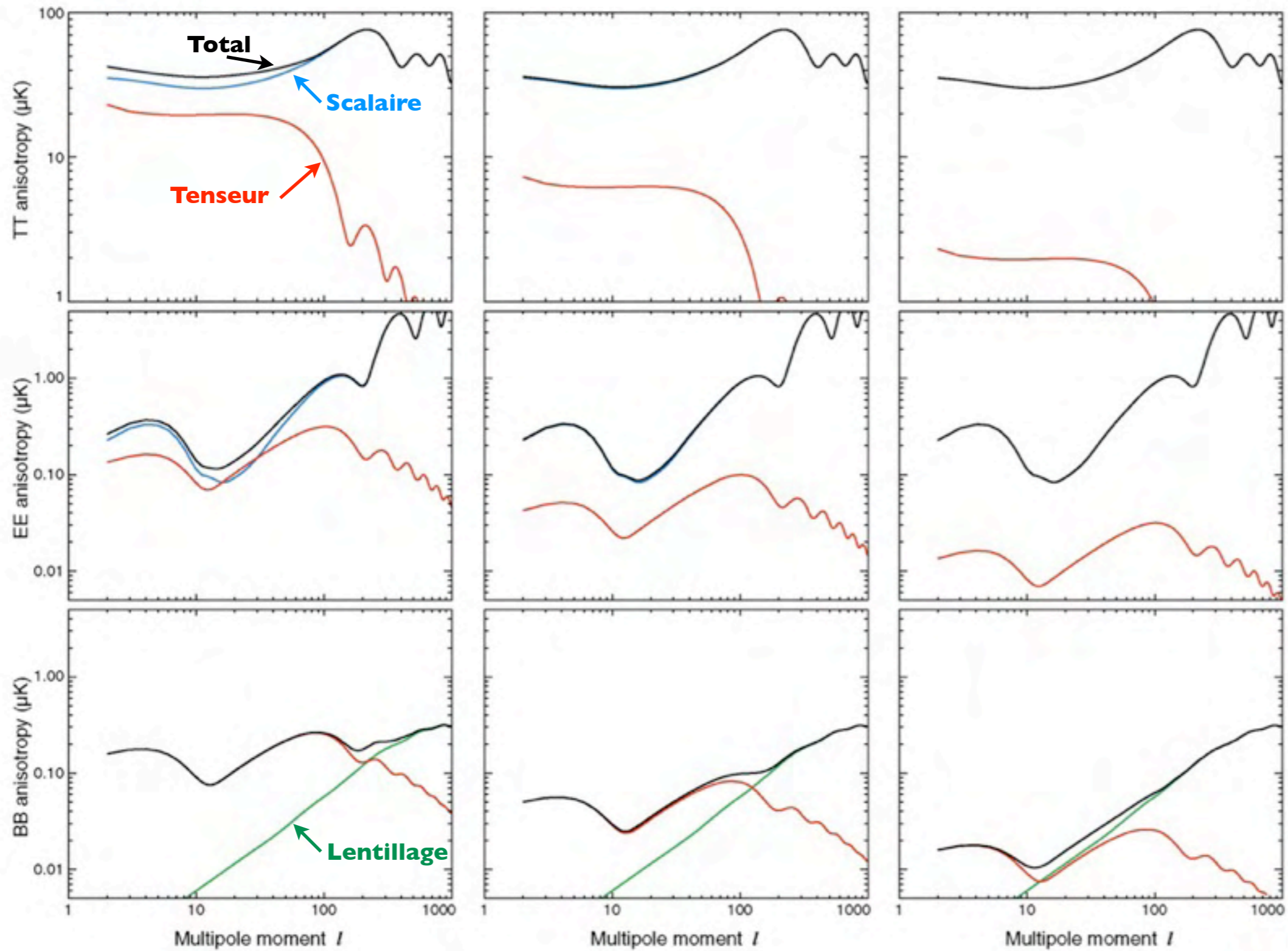
rapport entre modes B et E (pointing to r)

⇒ détecter les modes B de polarisation du CMB c'est :

- ▶ mettre en évidence les modes tenseurs
- ▶ Prouver qu'il y a eu inflation
- ▶ Mesurer son échelle en énergie

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \text{ GeV} \left(\frac{r_{\text{CMB}}}{0.01} \right)^{1/4}$$

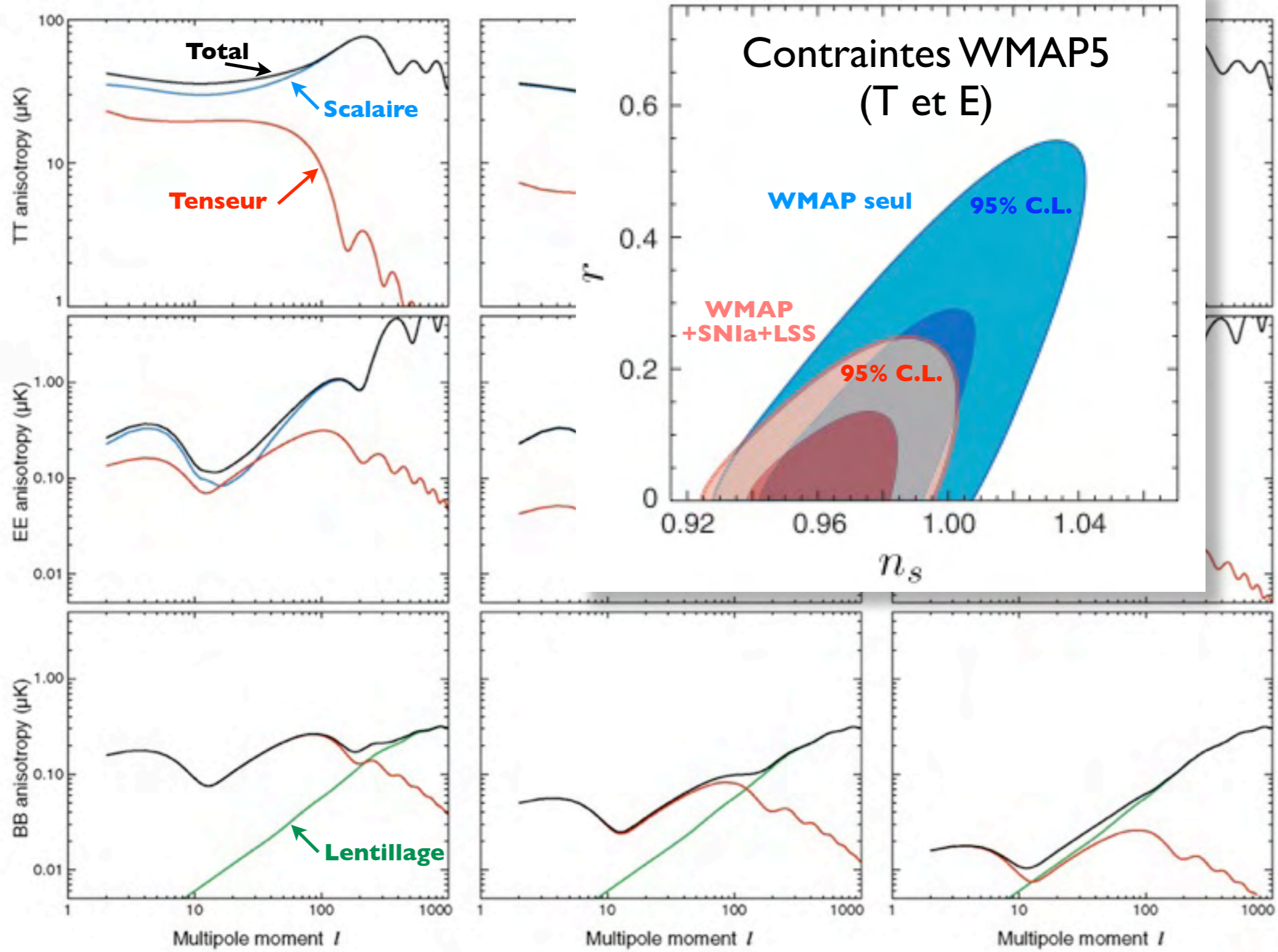




c/o Gary Hinshaw

Seuls les modes B permettent de «voir» les modes tenseurs directement





c/o Gary Hinshaw

Seuls les modes B permettent de «voir» les modes tenseurs directement



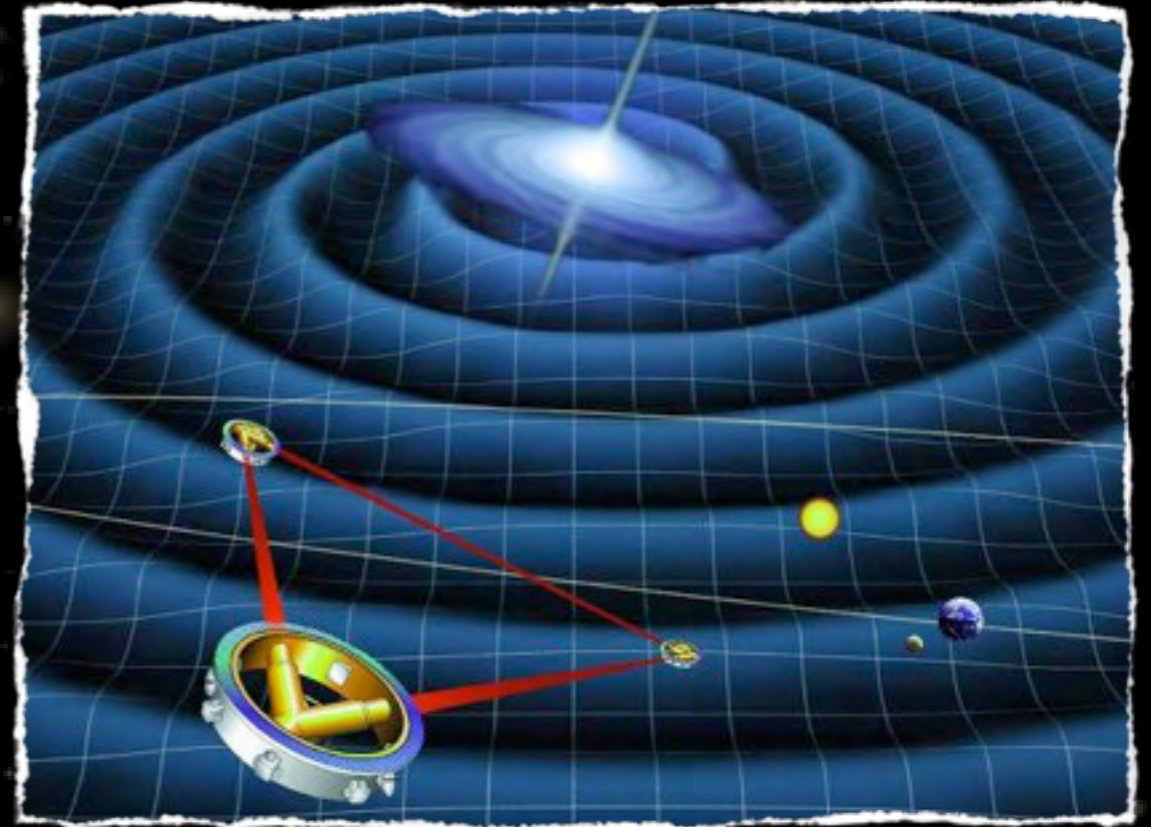
Seule autre approche

- Détecteurs directs d'ondes Gravitationnelles :

Virgo/Ligo

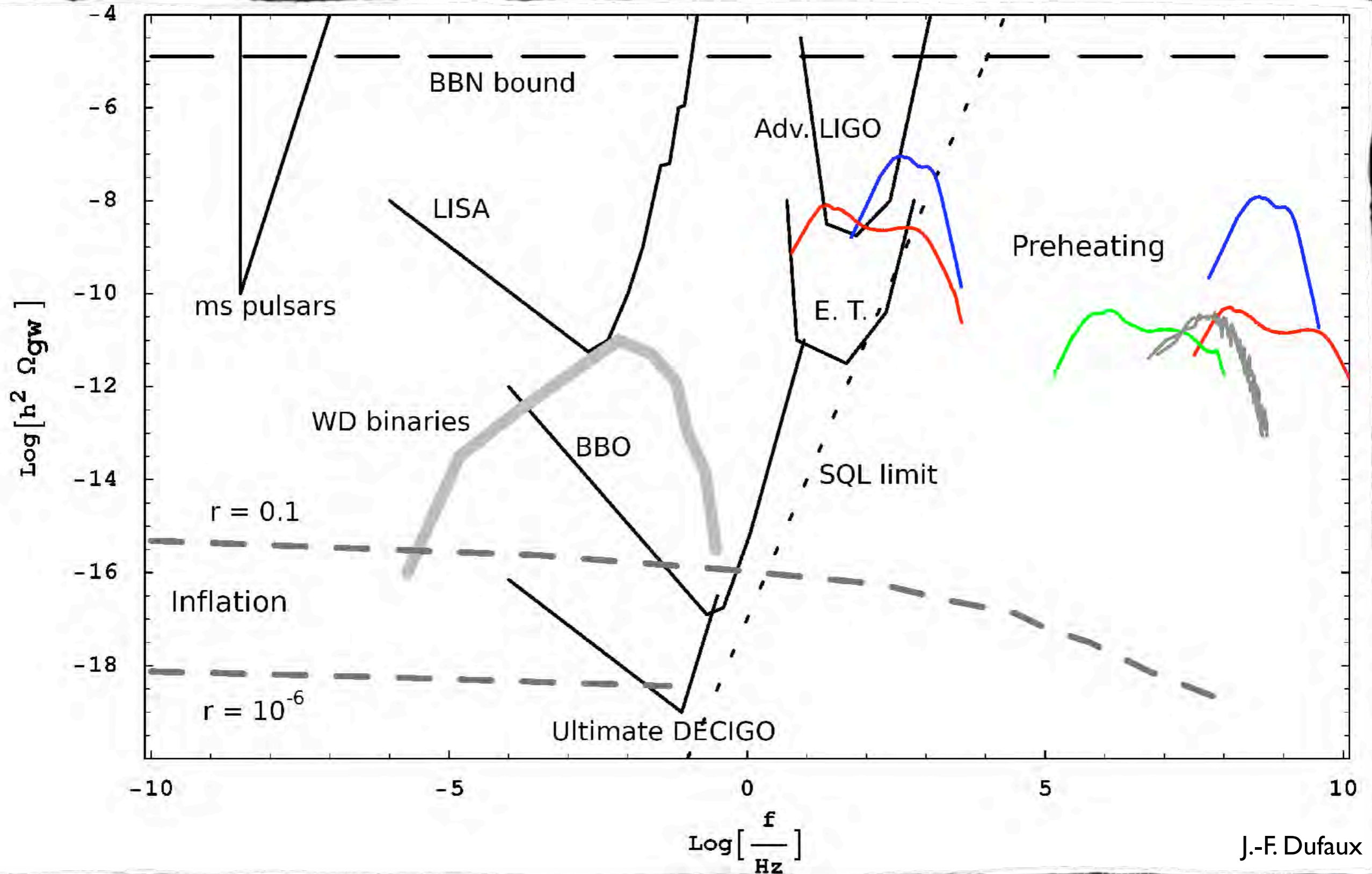


LISA (~2018)

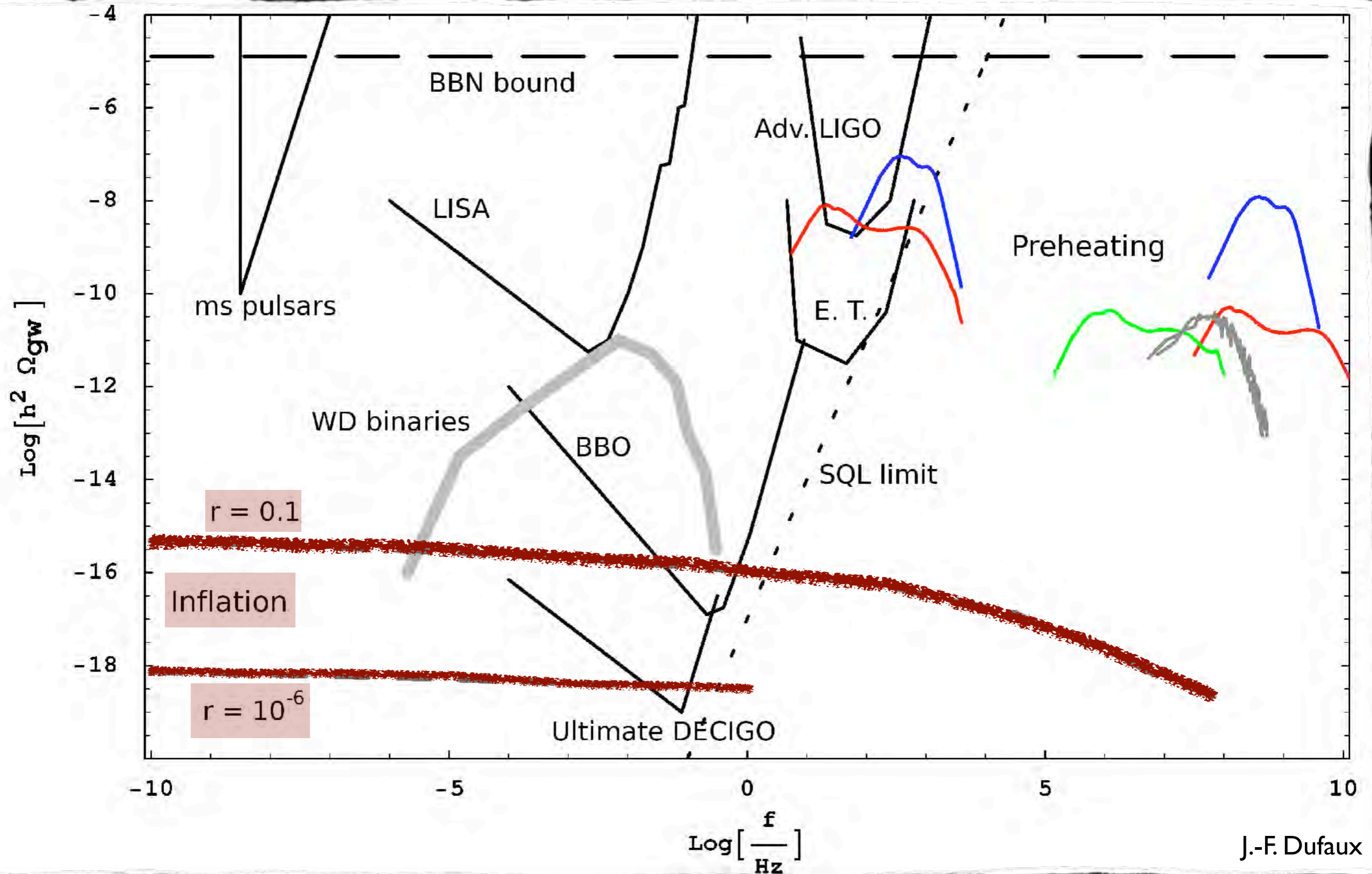


- La détection sera difficile : plus adaptés aux événements violents

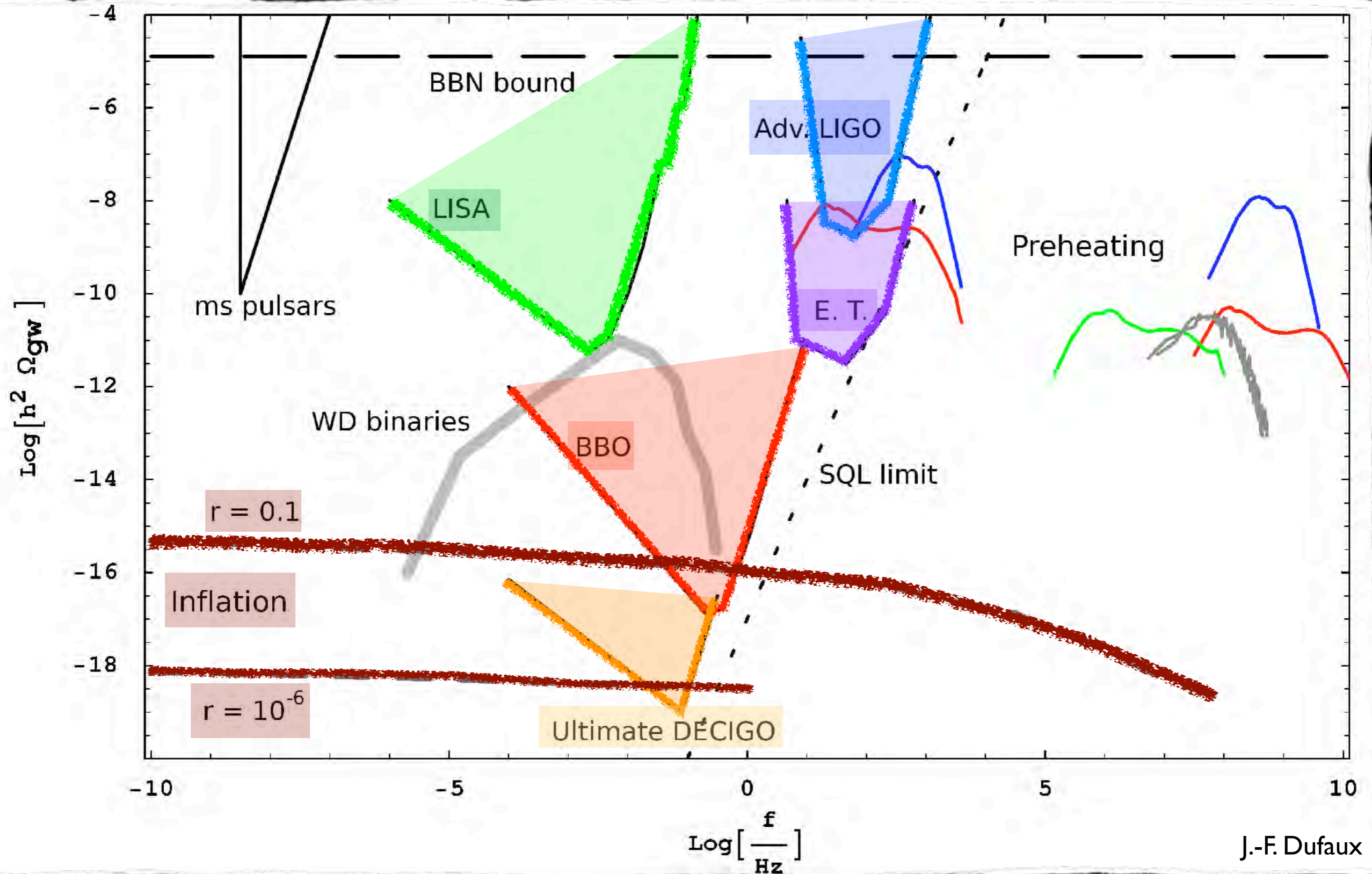
Perspectives de détection directe



Perspectives de détection directe



Perspectives de détection directe



Mesurer l'inflation avec le CMB ?

Quatre quantités à mesurer :

- A_s : connu
- n_s : connu
- A_t ou r : inconnu, requiert une **détection** du spectre B
- n_t : inconnu, requiert une **mesure** du spectre B

- Prédiction générique de l'inflation $r = -8n_t$

*Test de cohérence
de l'inflation*

- Mesure directe du potentiel par développement de Taylor:

$$V(\phi) \simeq V|_{\phi_{\text{CMB}}} + V'|_{\phi_{\text{CMB}}} (\phi - \phi_{\text{CMB}}) + \frac{1}{2} V''|_{\phi_{\text{CMB}}} (\phi - \phi_{\text{CMB}})^2 + \frac{1}{3!} V'''|_{\phi_{\text{CMB}}} (\phi - \phi_{\text{CMB}})^3$$

- A_s relié à V'
- n_s relié à V''
- *running de n_s* relié à V'''
- A_t relié à V

*Reconstruction de la forme
du potentiel de l'inflaton !*



Difficultés attendues dans la quête...

- Sensibilité :

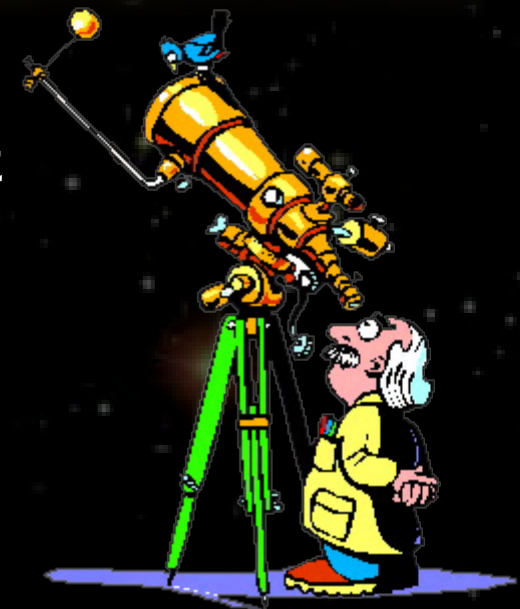
- La polarisation B est au mieux 10x plus faible que E
- L'amplitude pourrait être **très** basse ...
- 1 année de Planck, c'est $S/N=1$ pour $T/S=0.01$
- Une mission spatiale n'est pas pour demain ...

- Avant-plans :

- Nécessité de les soustraire avec précision
 - ➔ Détecteur multi-longueur d'onde
- Observer un région ultra-propre
 - ➔ Ne peut pas être trop petite car les modes B primordiaux sont aux grandes échelles

- Effets systématiques :

- L'instrument induit de la fuite de T dans E et B
 - ➔ Les angles des polariseurs, la propreté des lobes sont critiques
 - ➔ La cross-polarisation est aussi un problème majeur
- Polarization atmosphérique ...



Instruments possibles

- Imageurs :

- Bonne sensibilité avec des matrices de bolomètres
- Systématiques induites par le télescope (lobes, angles des polariseurs, nécessité de faire des différences entre détecteurs pour la polarisation)
- Très sensibles à l'atmosphère



Instruments possibles

- Imageurs :

- Bonne sensibilité avec des matrices de bolomètres
- Systématiques induites par le télescope (lobes, angles des polariseurs, nécessité de faire des différences entre détecteurs pour la polarisation)
- Très sensibles à l'atmosphère



- Interféromètres hétérodynes :

- Excellents pour les systématiques (pas d'optique)
- Sensibilité limitée par les HEMT
- Difficile de faire des corrélateurs avec plus de ~ 15 voies (DASI, CBI)

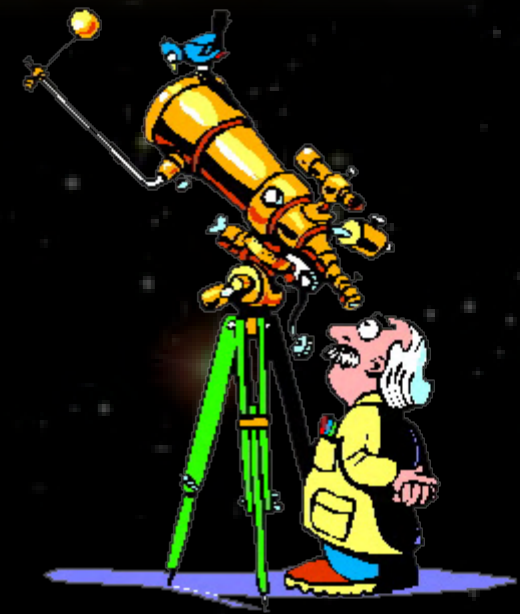


Première détection de la polarisation du CMB !



Projets expérimentaux de recherche des modes B

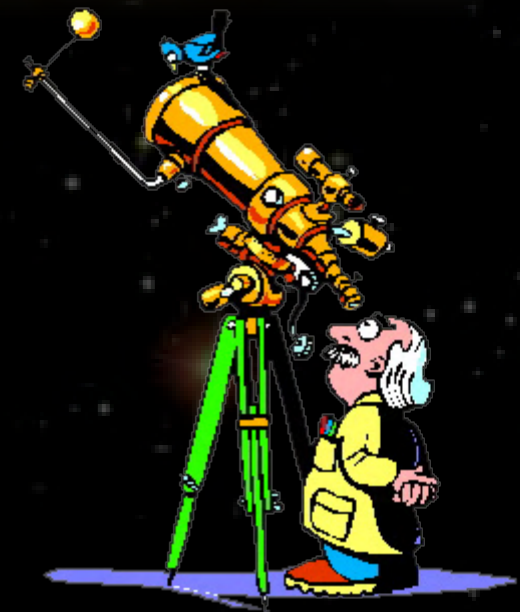
- Planck ! (2009)
 - Détection possible de $r=0.03$ à 95% C.L. (28 mois)
 - Ciel complet \Rightarrow pic de réionisation ($\ell=7$)
- Au sol et en ballon (2009-2012)
 - (USA - Europe)
 - Imageurs : BICEP, EBEX, SPIDER, QUIET, CLOVER
 - Interféromètres hétérodynes: \emptyset
- Futurs projets satellites (\sim longtemps)
 - CMBPol
 - BPOL



NB: il n'y a QUE des imageurs ...

Projets expérimentaux de recherche des modes B

- Planck ! (2009)
 - Détection possible de $r=0.03$ à 95% C.L. (28 mois)
 - Ciel complet \Rightarrow pic de réionisation ($\ell=7$)
- Au sol et en ballon (2009-2012)
 - (USA - Europe)
 - Imageurs : BICEP, EBEX, SPIDER, QUIET, ~~CLOVER~~
 - Interféromètres hétérodynes: \emptyset
- Futurs projets satellites (\sim longtemps)
 - CMBPol
 - BPOL



NB: il n'y a QUE des imageurs ...

BICEP



BICEP

Caltech / Cardiff / JPL / Stanford
UCB / UCSD

Goal: ~ 80 B-mode limit

- small (30 cm) aperture
- cold (4K) telescope
- 96 JPL detectors
- 100 GHz + 150 GHz
- sited at South Pole
- deployed late 2005



JPL

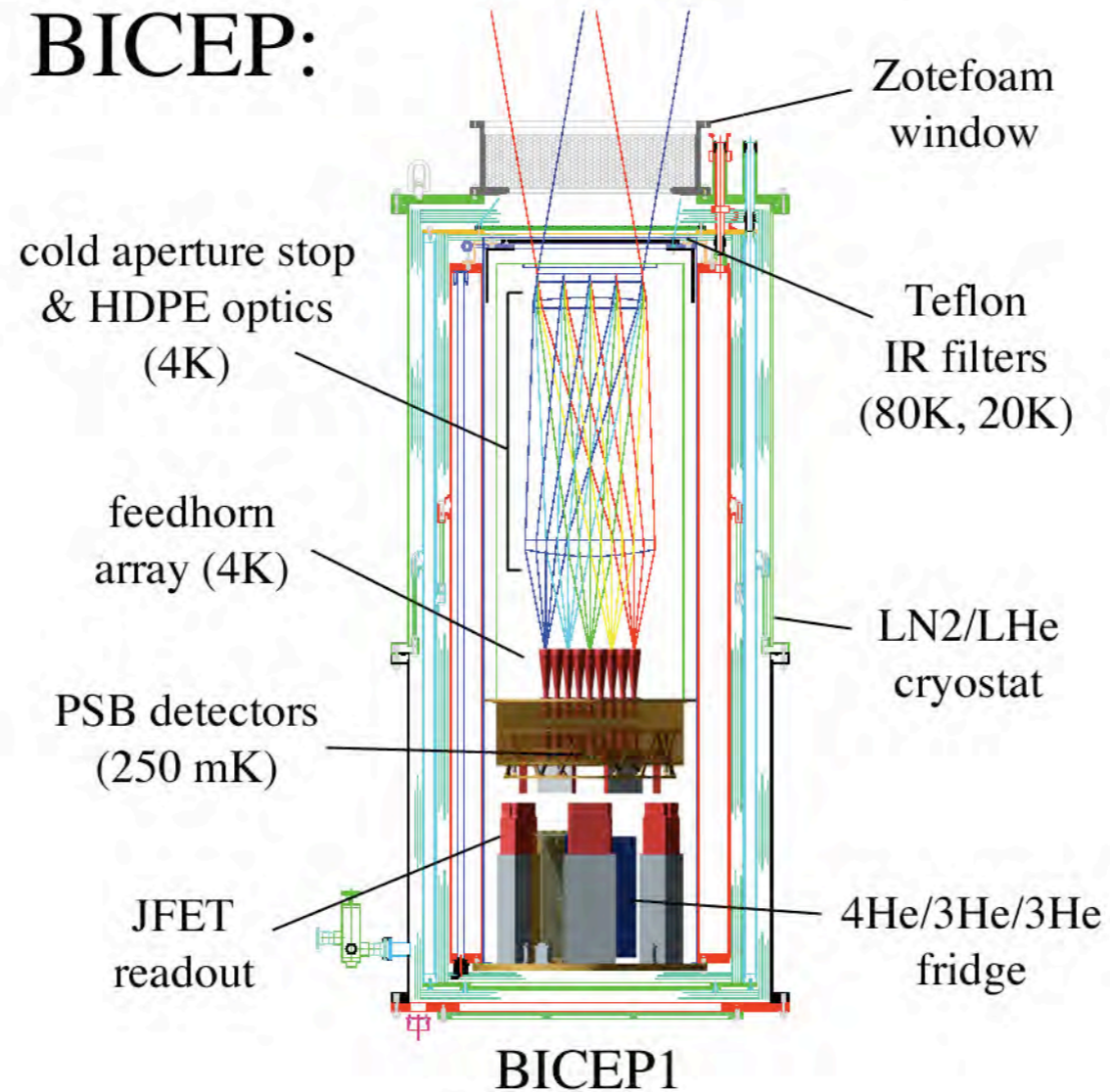


(From A. Lange)



BICEP

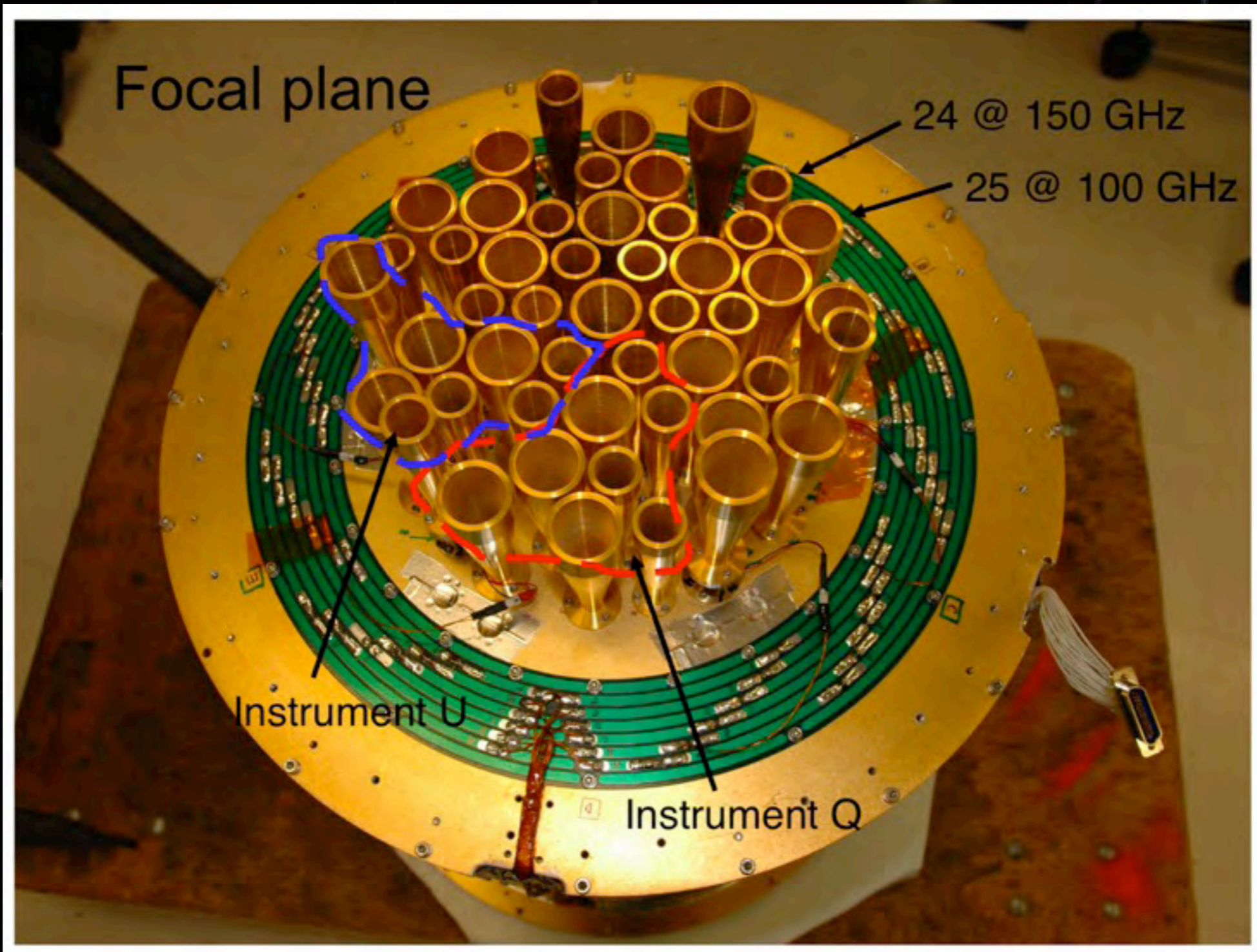
BICEP:



(From A. Lange)



BICEP

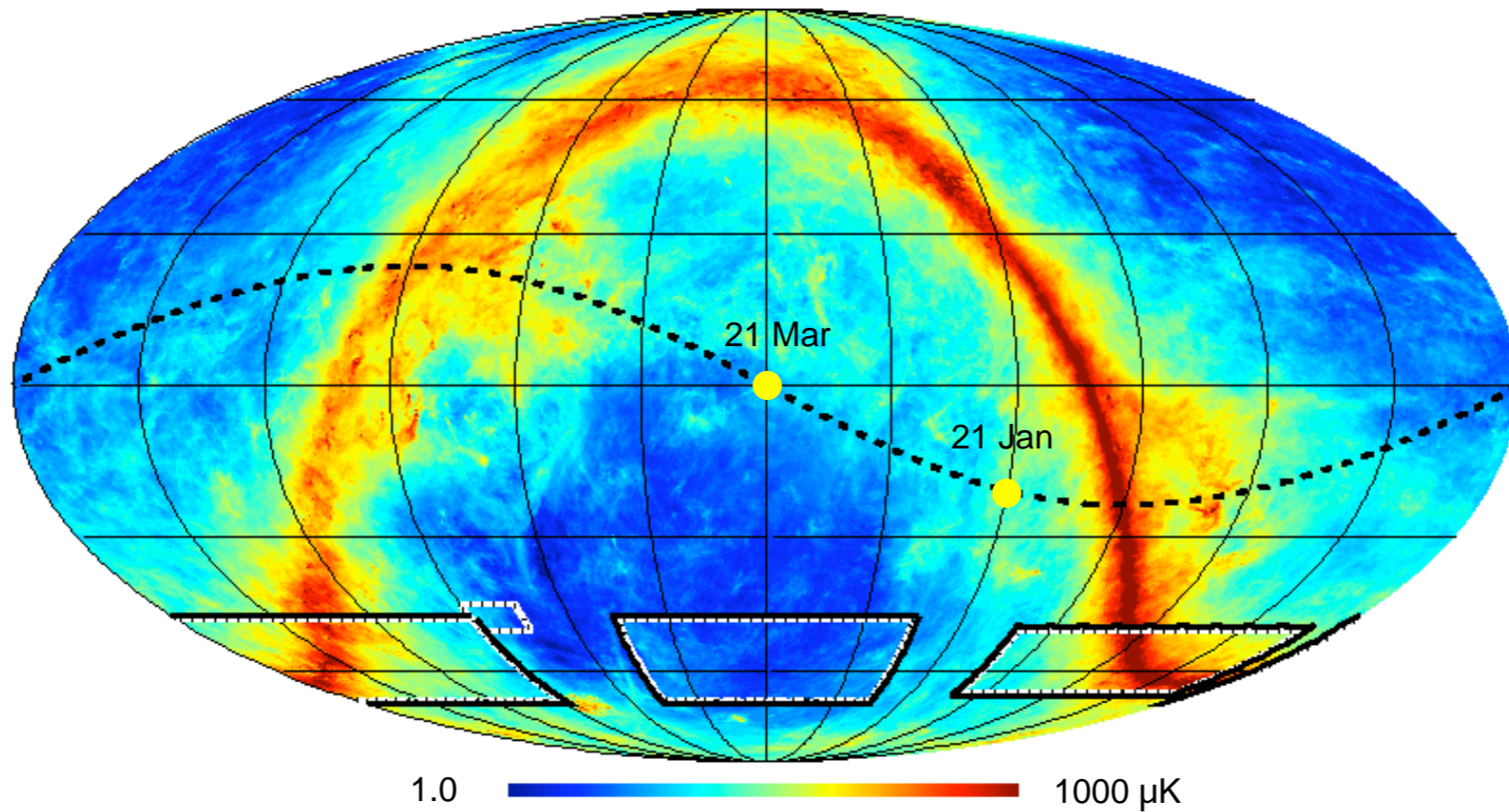


(From A. Lange)

BICEP

BICEP field selection

100 GHz FDS Dust Model

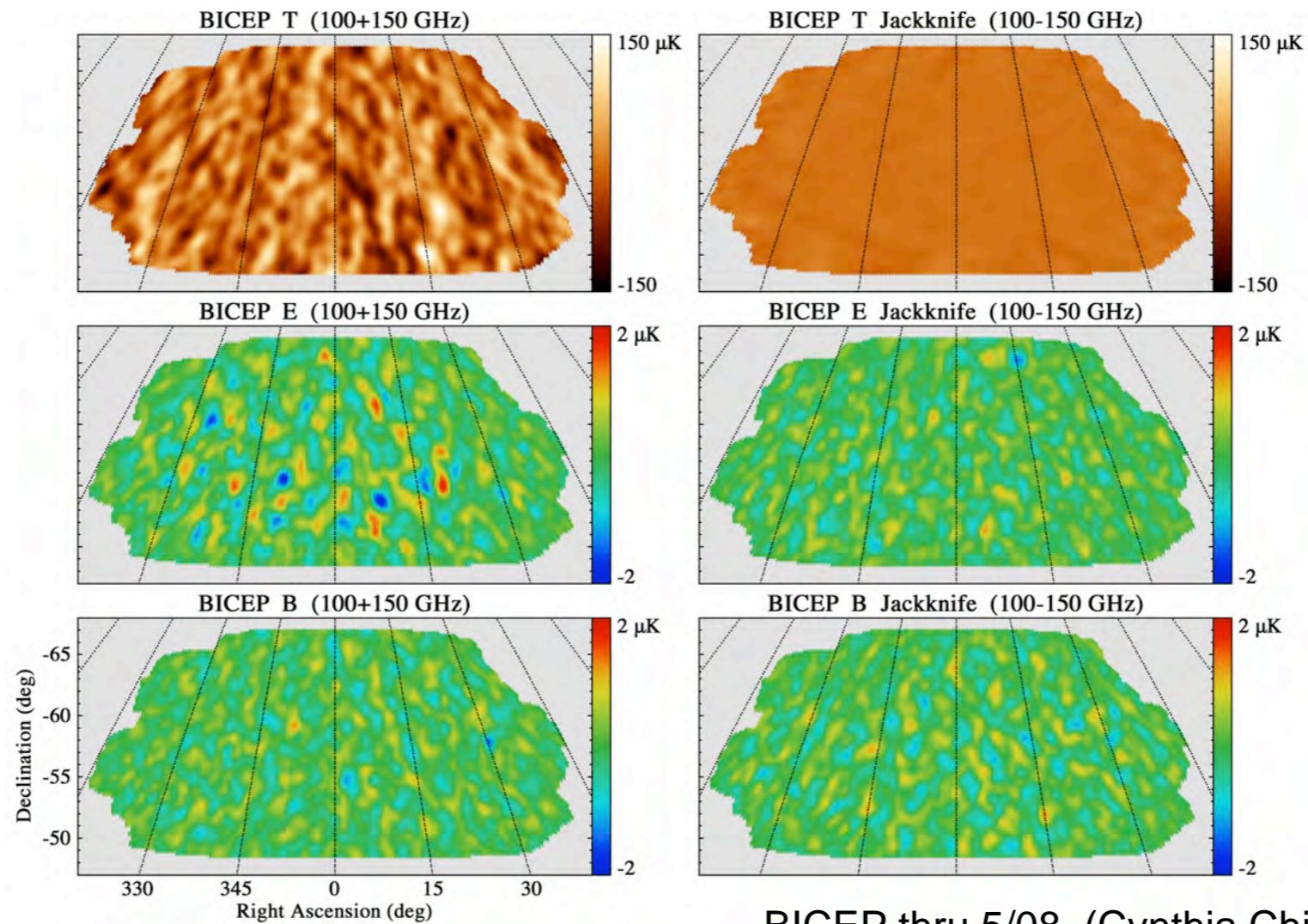


> 3000 hours on CMB target in first season!

(From A. Lange)

BICEP

Pretty pictures.....

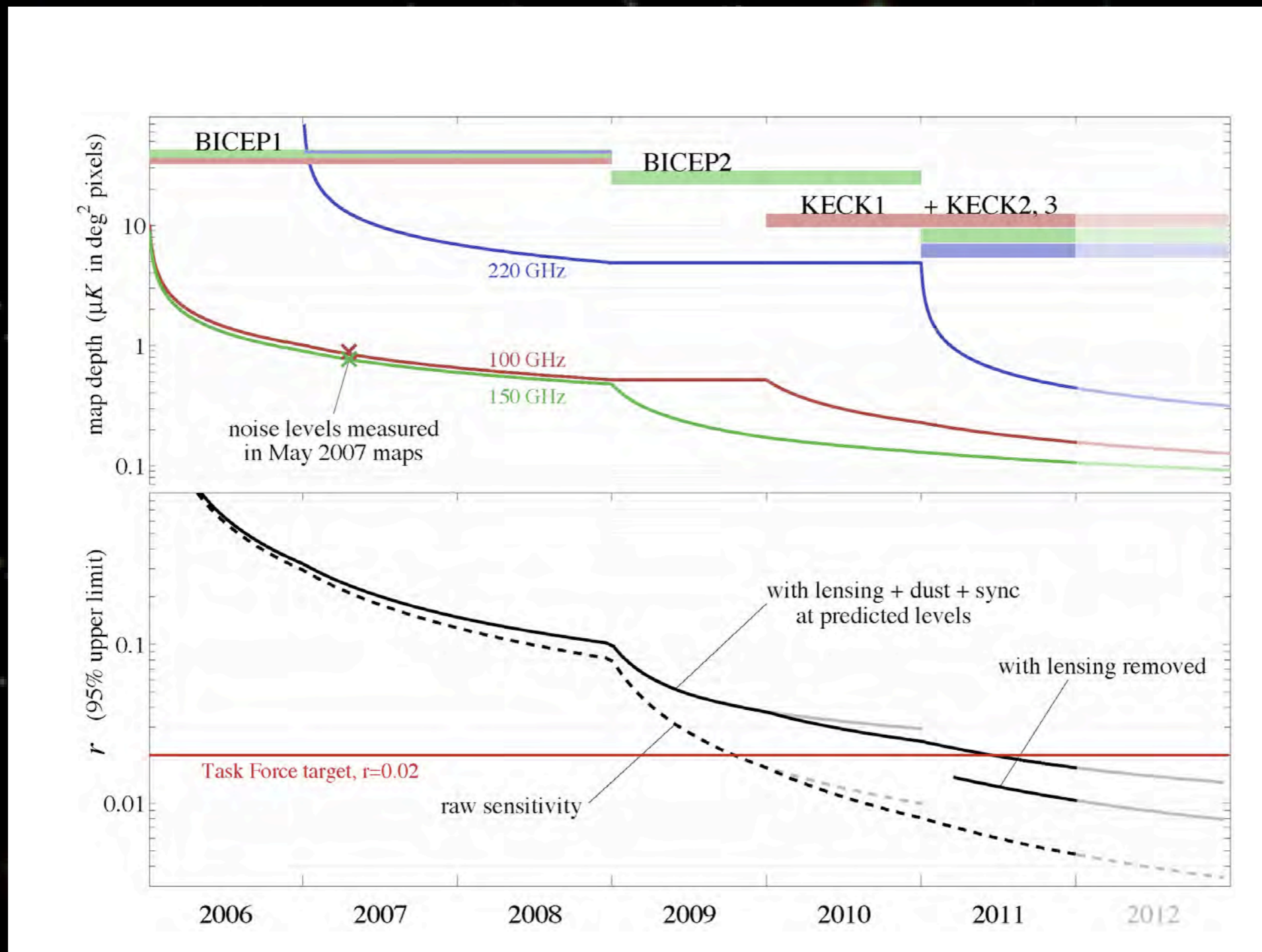


BICEP thru 5/08 (Cynthia Chiang)

(From A. Lange)



BICEP, BICEP2, KECK



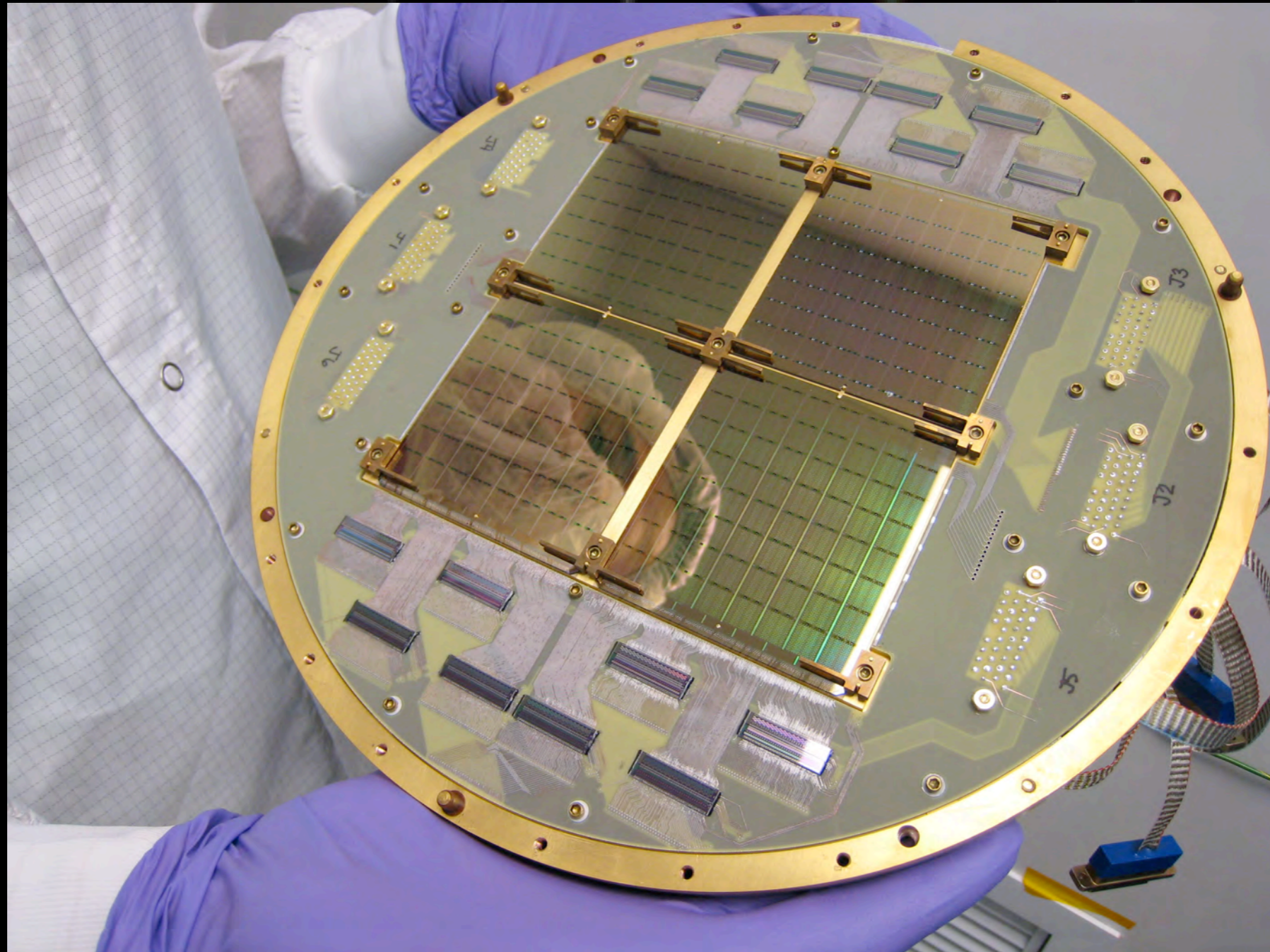
(From A. Lange)



BICEP

Antenna
coupled
TES array
(4x64)

SQUID
Mux
Readout

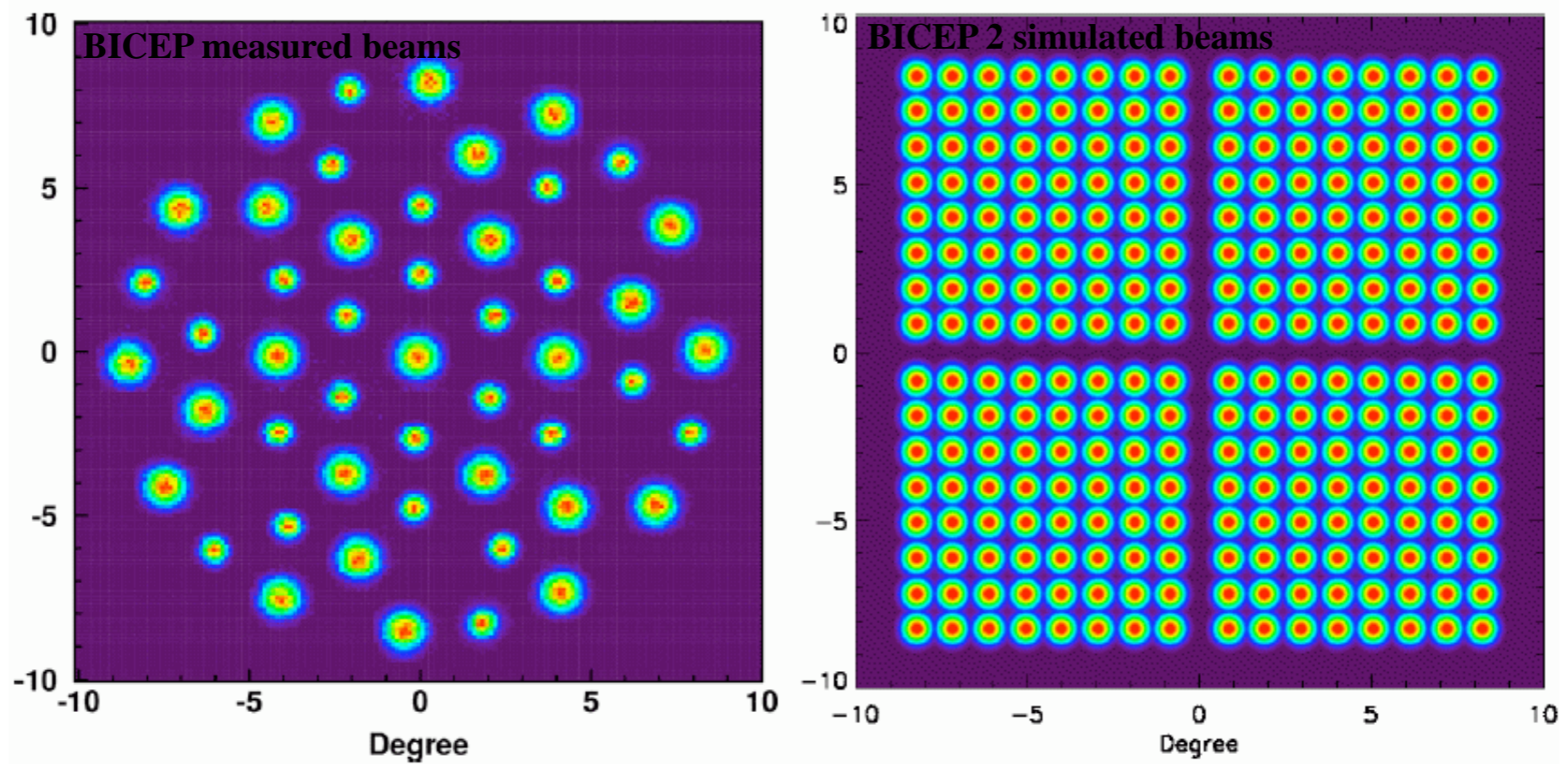


BICEP2 focal plane, May 2009

(From A. Lange)

BICEP2

Getting more pixels on the sky ...



(From A. Lange)

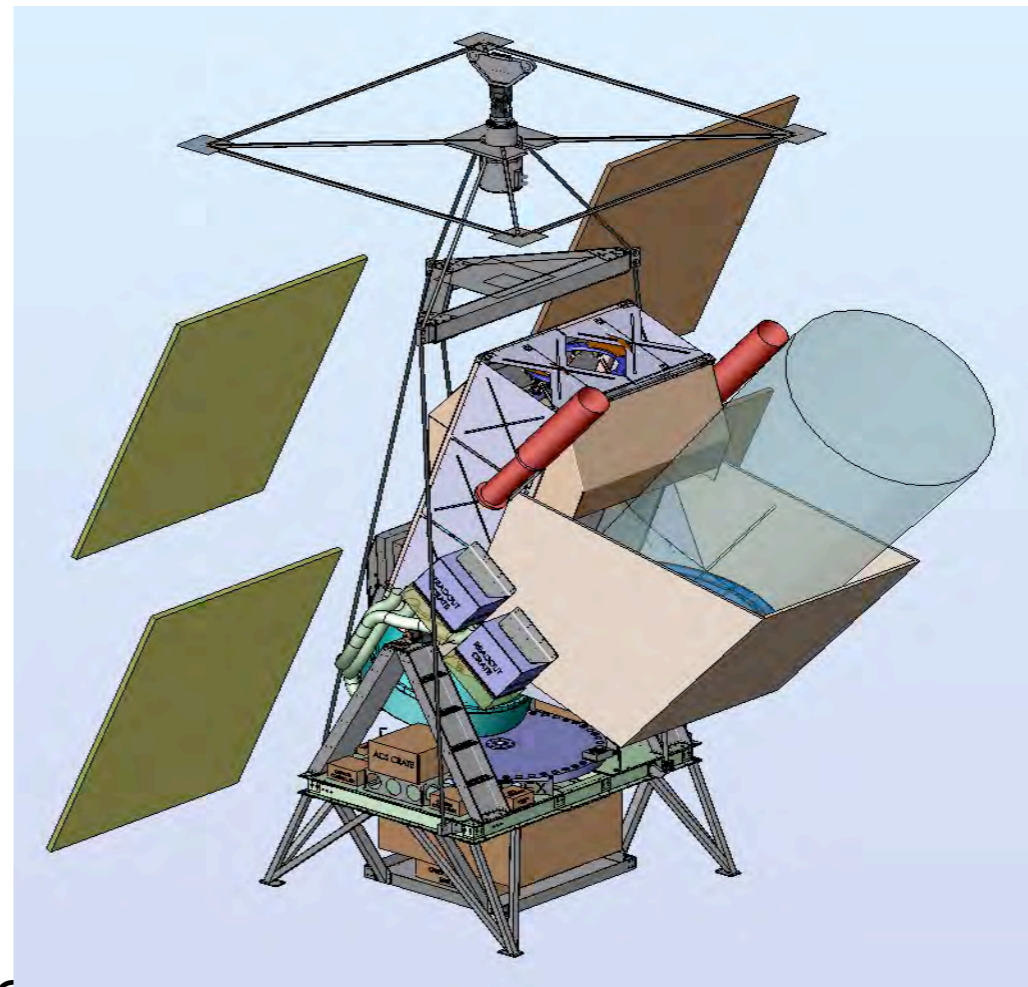


EBEx



EBEx Summary

- 14 day flight, 1476 TESs
- 420 deg²
- ~24,000 8' pixels on the sky
- Low dust contrast (4 μ K rms)
- 796, 398, 282 TES detectors at 150, 250, 410 GHz
- 0.7 μ K/8' pixel - Q/U;
0.5 μ K/8' pixel - T
- Currently integrating
 - detectors into cryostat in UMN
 - Pointing sensors onto gondola in CU
- North American flight: ~~Autumn 2008~~ **Mai 2009**
- Long Duration (Antarctic) flight: Austral Summer 2009



Will Grainger

(From K. Ganga)



EBEx

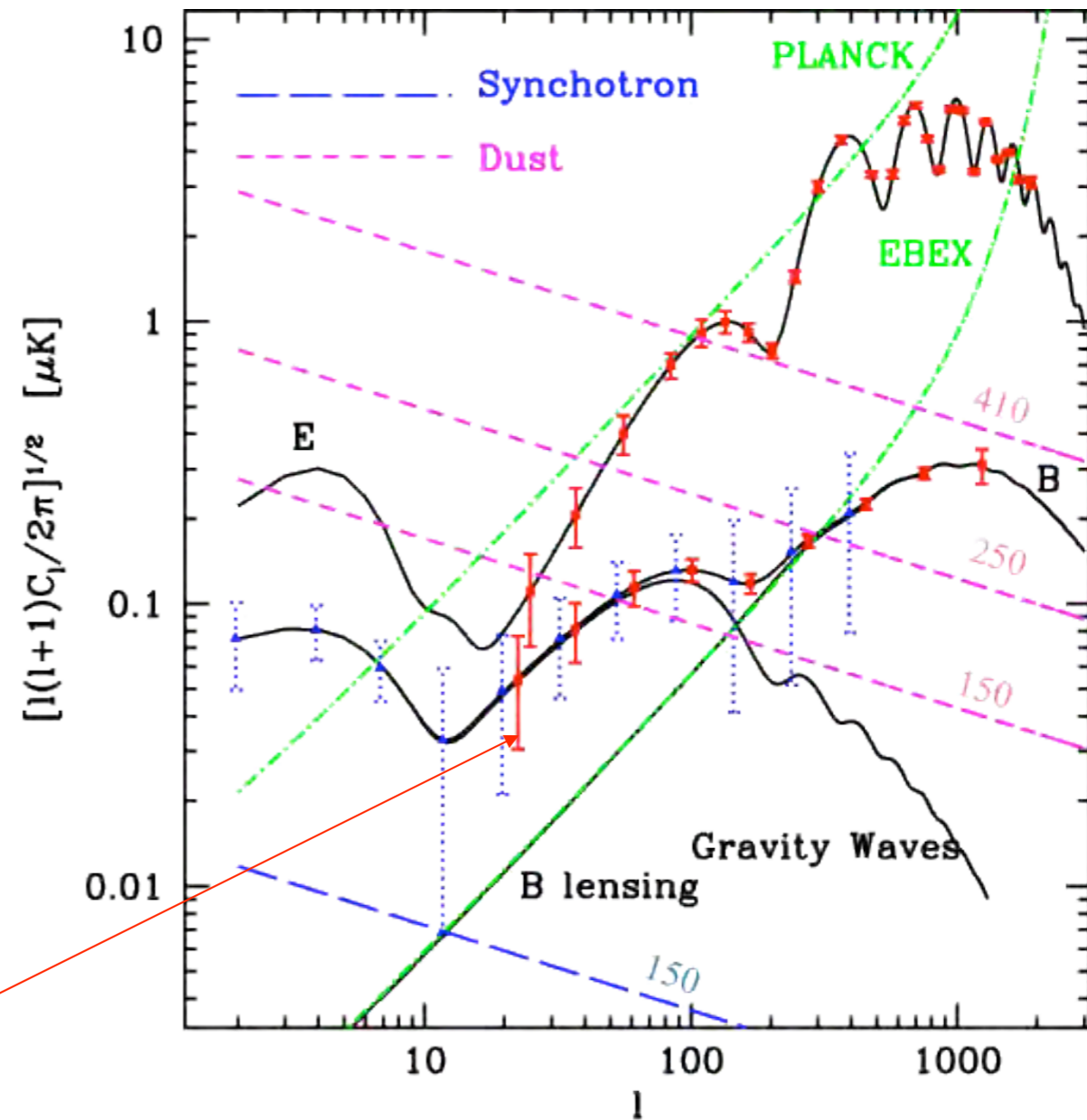


EBEx Expected Results

- Detect (or set upper bound) in inflationary B-mode
 - $T/S < 0.02$ at 2σ (excluding systematic and foreground subtraction uncertainty)
- Detect lensing B-mode
 - 5% error on amplitude of lensing power spectrum
- Measure E-E power spectrum
- Determine properties of polarized dust

Will Grainger

EBEX, 14 days



(From K. Ganga)

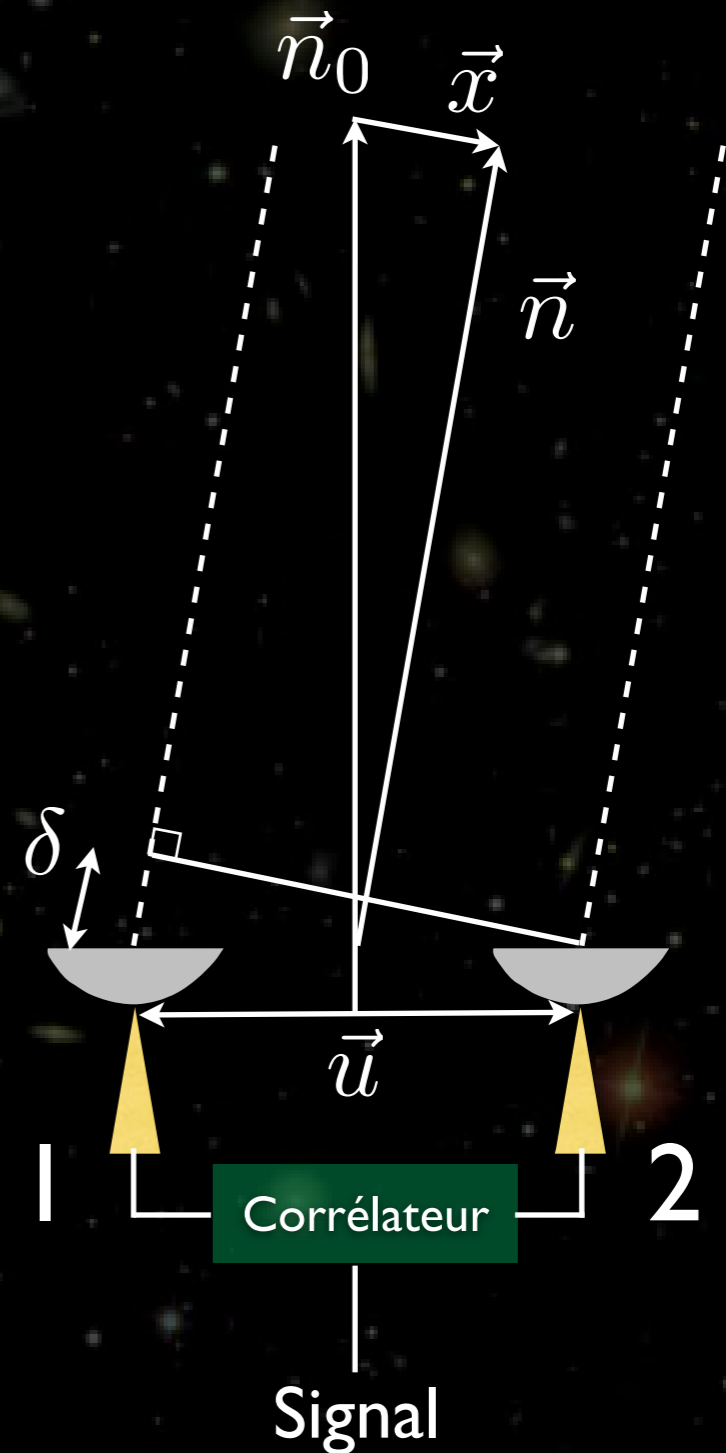


l'interférométrie en bref

- Ligne de base : $||\vec{u}|| = \frac{D}{\lambda} \quad \ell = 2\pi ||\vec{u}||$
- Lobe : $B(\vec{x})$
- Signal en sortie : $S(\vec{u}) = \int E_1(\vec{n})E_2^*(\vec{n})B^2(\vec{n})d\vec{n}$
- Déphasage : $\delta = 2\pi\vec{u} \cdot \vec{x}$
- Visibilités :

$$S(\vec{u}) = \int |E(\vec{n})|^2 B^2(\vec{n}) \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{x})d\vec{n}$$

Un interféromètre mesure la transformée de Fourier du champ observé



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- Bolomètres :

- Détection de la puissance du rayonnement incident
- Haute sensibilité, amplificateurs bas bruit : BLIP
- Possibilité de faire de grandes matrices

- Interférométrie bolométrique additive :

- Pas de corrélateur : $\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle$
- Mesure des 4 paramètres de Stokes
- Insensible aux fluctuations temporelles de l'atmosphère (et à toutes les variations temporelles systématiques)



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

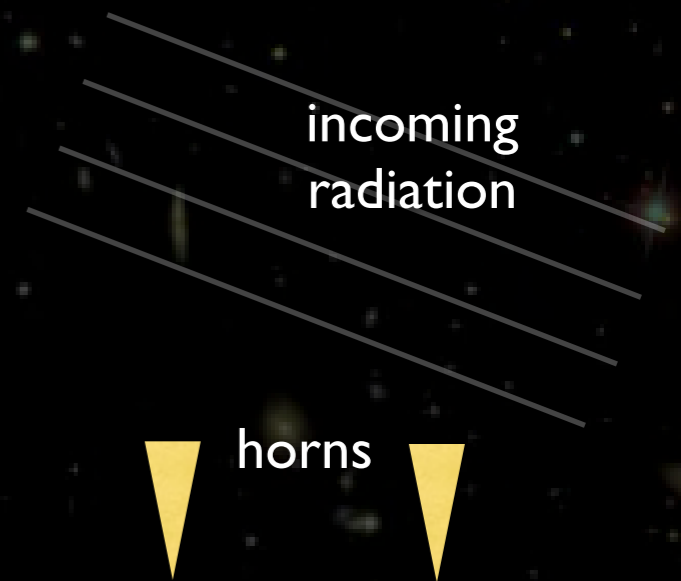
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- Bolomètres :

- Détection de la puissance du rayonnement incident
- Haute sensibilité, amplificateurs bas bruit : BLIP
- Possibilité de faire de grandes matrices

- Interférométrie bolométrique additive :

- Pas de corrélateur : $\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle$
- Mesure des 4 paramètres de Stokes
- Insensible aux fluctuations temporelles de l'atmosphère (et à toutes les variations temporelles systématiques)



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

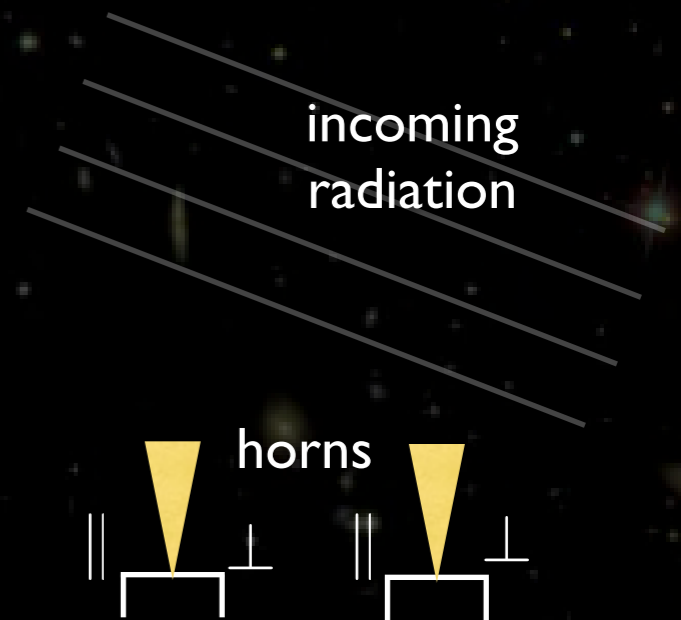
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- Bolomètres :

- Détection de la puissance du rayonnement incident
- Haute sensibilité, amplificateurs bas bruit : BLIP
- Possibilité de faire de grandes matrices

- Interférométrie bolométrique additive :

- Pas de corrélateur : $\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle$
- Mesure des 4 paramètres de Stokes
- Insensible aux fluctuations temporelles de l'atmosphère (et à toutes les variations temporelles systématiques)



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

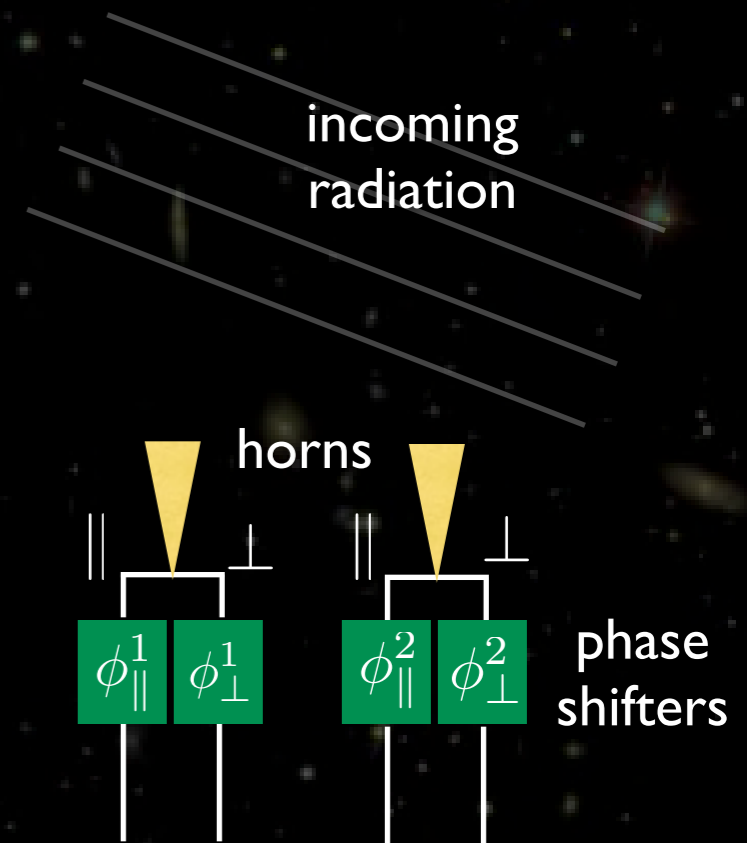
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- Bolomètres :

- Détection de la puissance du rayonnement incident
- Haute sensibilité, amplificateurs bas bruit : BLIP
- Possibilité de faire de grandes matrices

- Interférométrie bolométrique additive :

- Pas de corrélateur : $\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle$
- Mesure des 4 paramètres de Stokes
- Insensible aux fluctuations temporelles de l'atmosphère (et à toutes les variations temporelles systématiques)



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

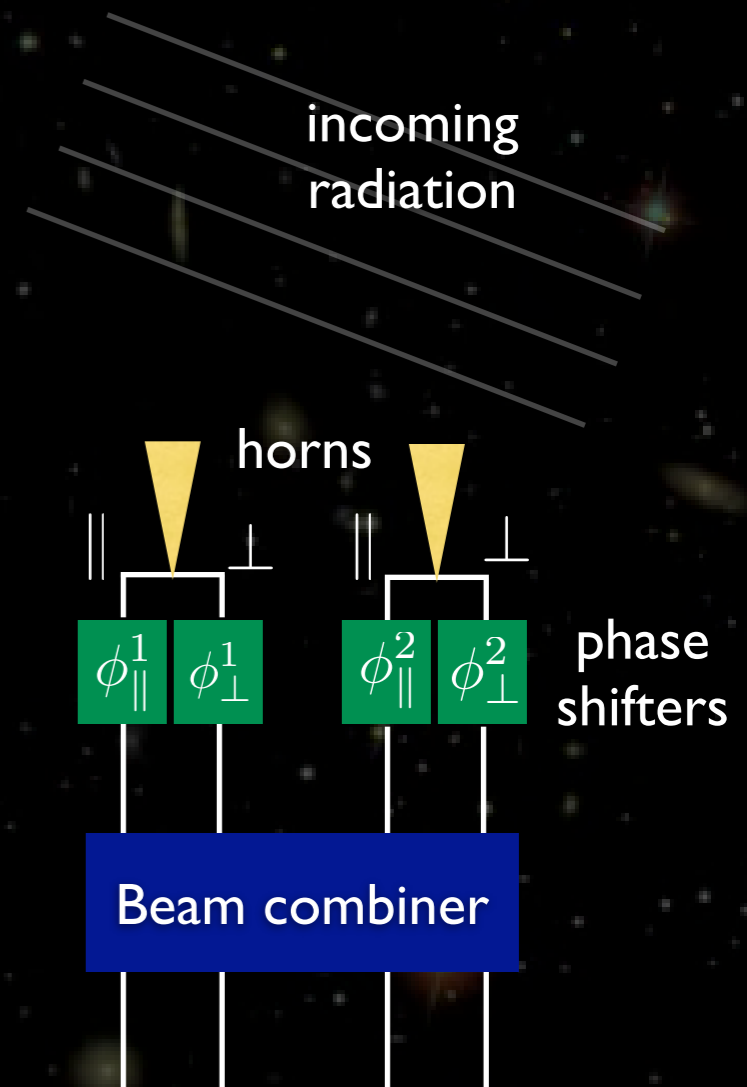
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- Bolomètres :

- Détection de la puissance du rayonnement incident
- Haute sensibilité, amplificateurs bas bruit : BLIP
- Possibilité de faire de grandes matrices

- Interférométrie bolométrique additive :

- Pas de corrélateur : $\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle$
- Mesure des 4 paramètres de Stokes
- Insensible aux fluctuations temporelles de l'atmosphère (et à toutes les variations temporelles systématiques)



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

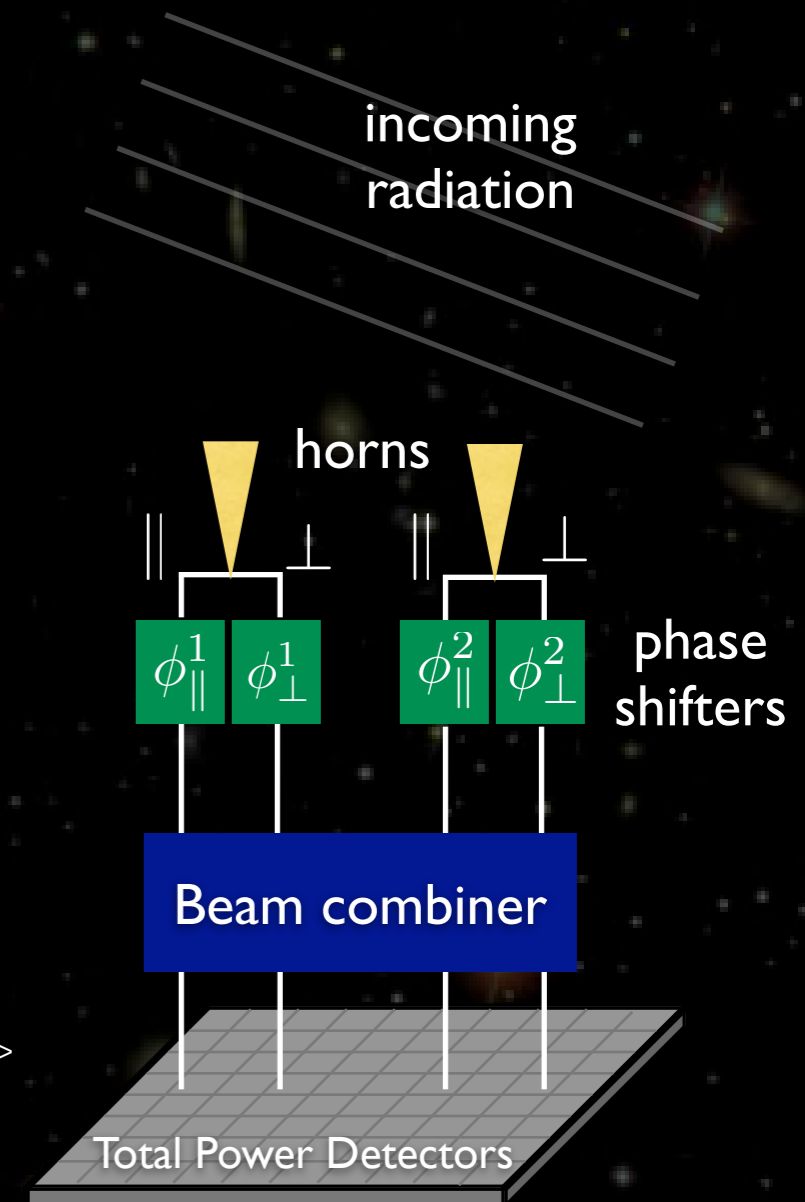
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- Bolomètres :

- Détection de la puissance du rayonnement incident
- Haute sensibilité, amplificateurs bas bruit : BLIP
- Possibilité de faire de grandes matrices

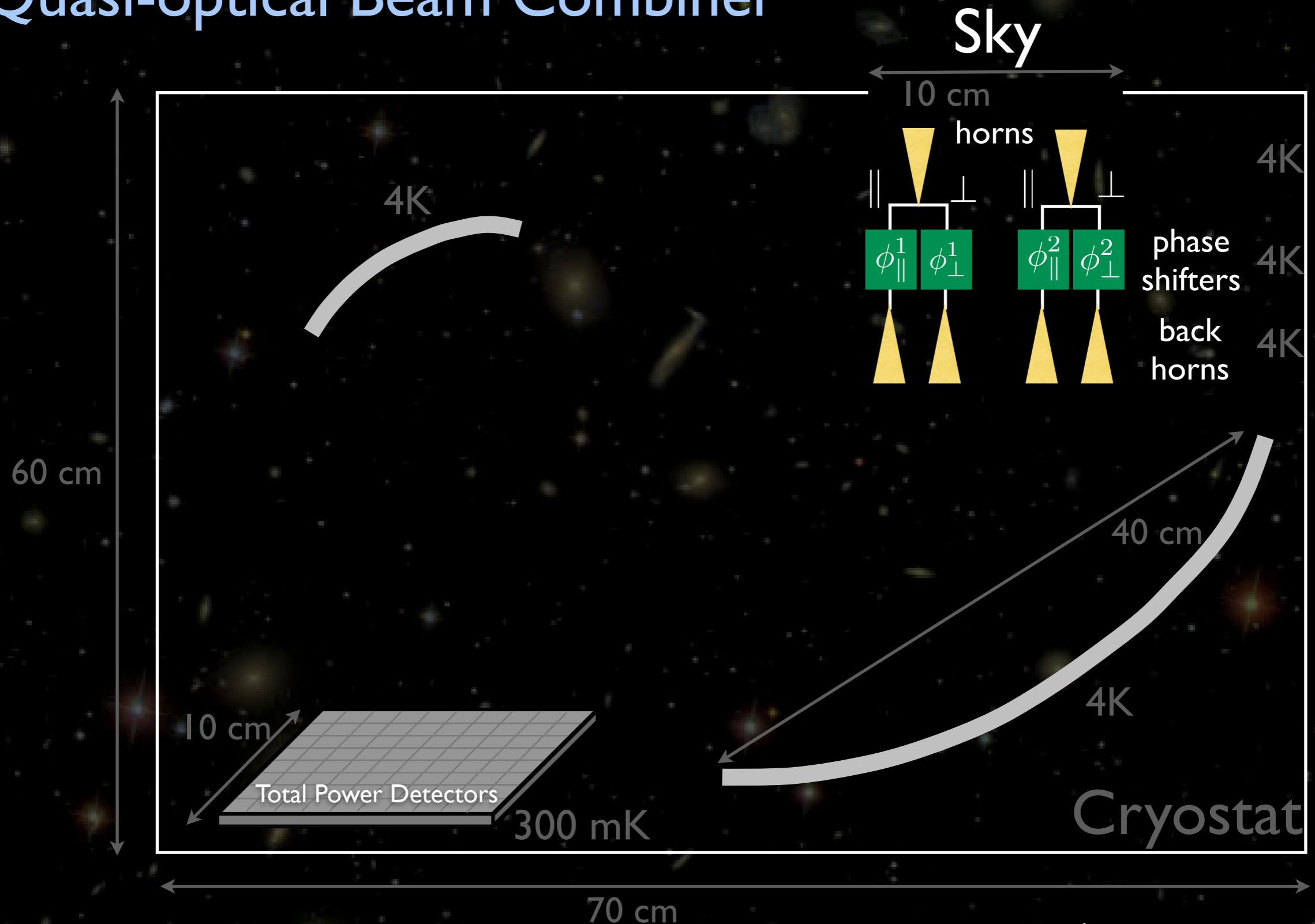
- Interférométrie bolométrique additive :

- Pas de corrélateur : $\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle$
- Mesure des 4 paramètres de Stokes
- Insensible aux fluctuations temporelles de l'atmosphère (et à toutes les variations temporelles systématiques)



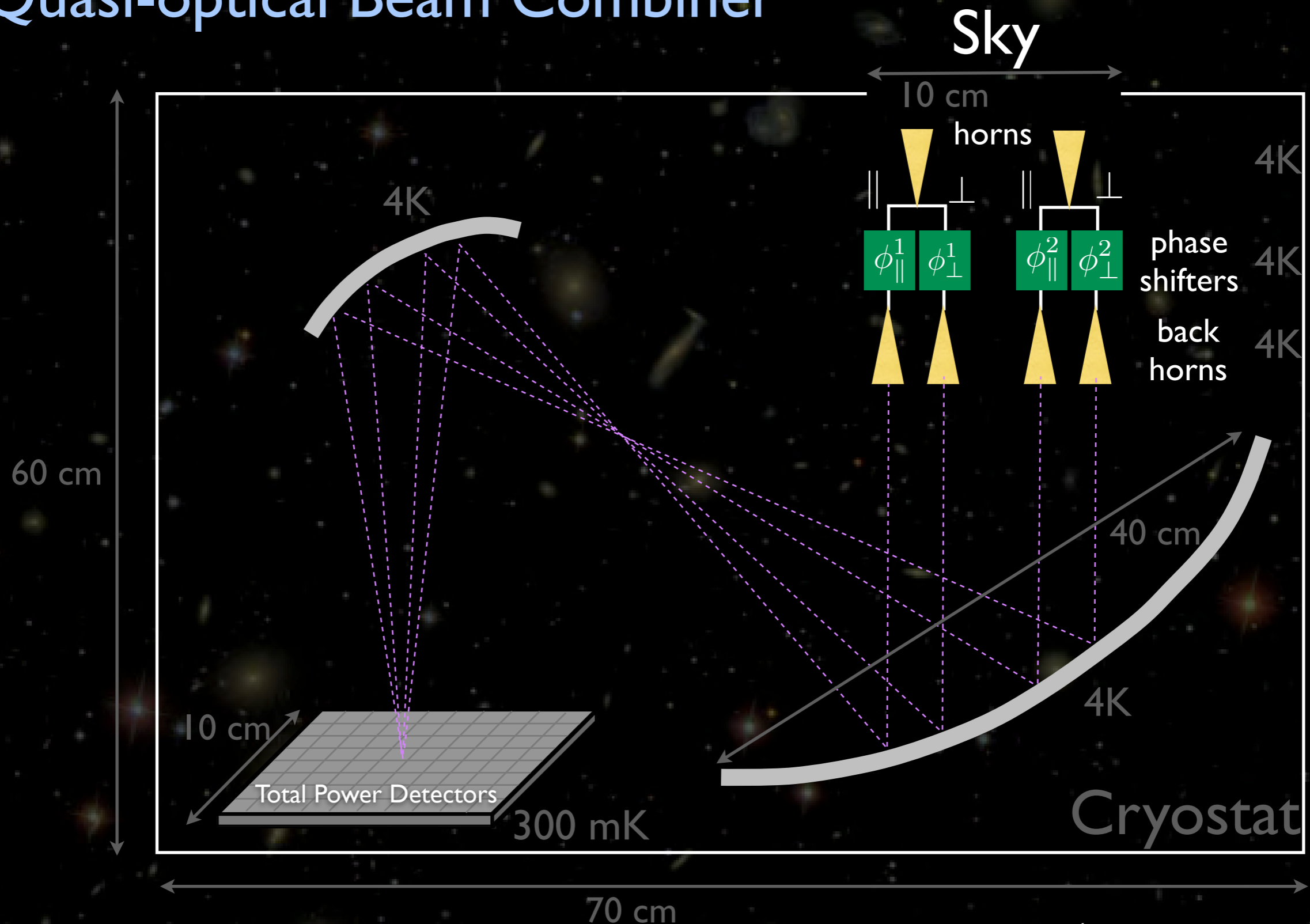
Le concept de BRAIN

- Quasi-optical Beam Combiner



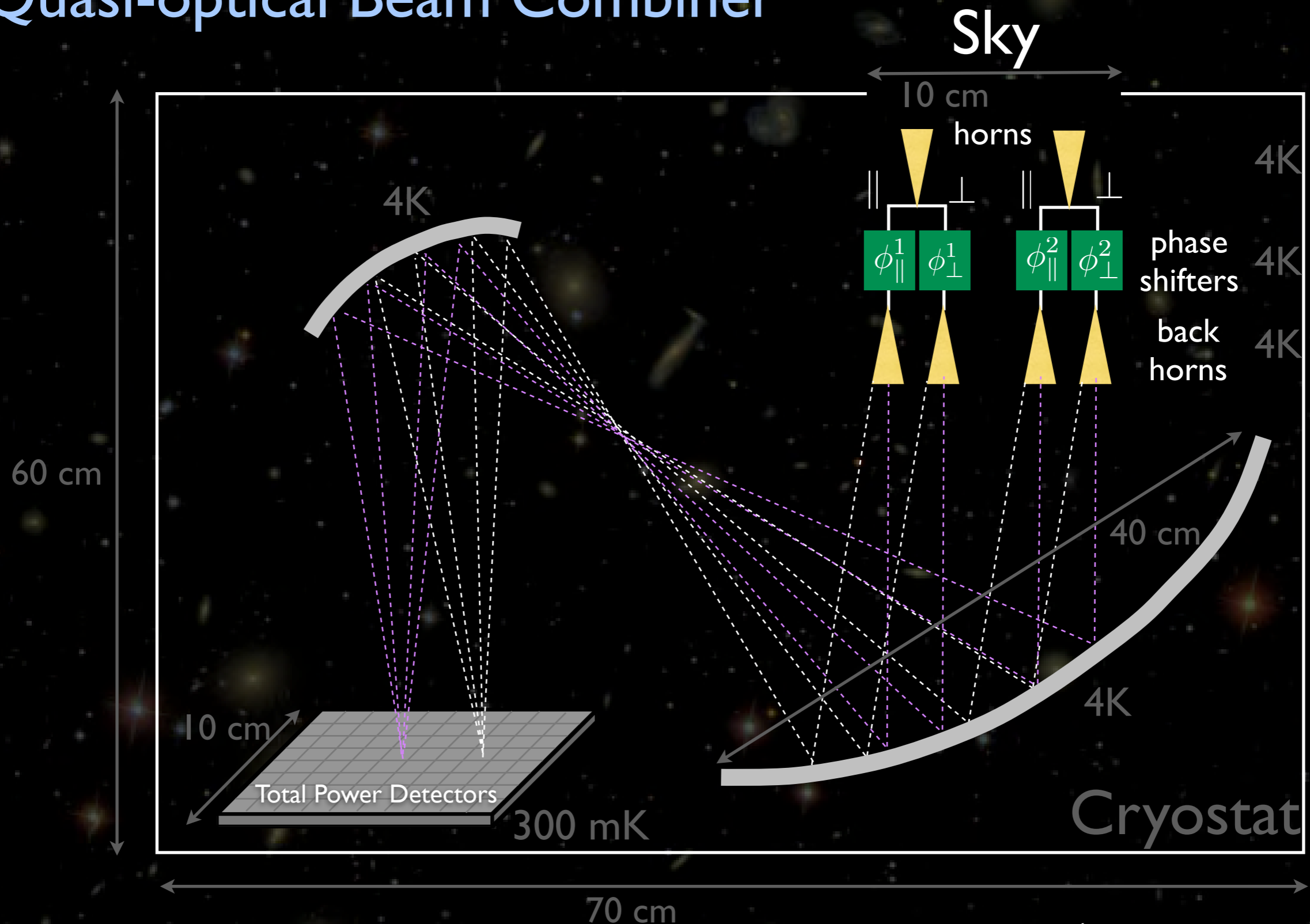
Le concept de BRAIN

- Quasi-optical Beam Combiner



Le concept de BRAIN

- Quasi-optical Beam Combiner



Quasi Optical Combiner

- Les images de tous les cornets sont superposées sur la matrice de bolomètres
- On forme des franges d'interférence



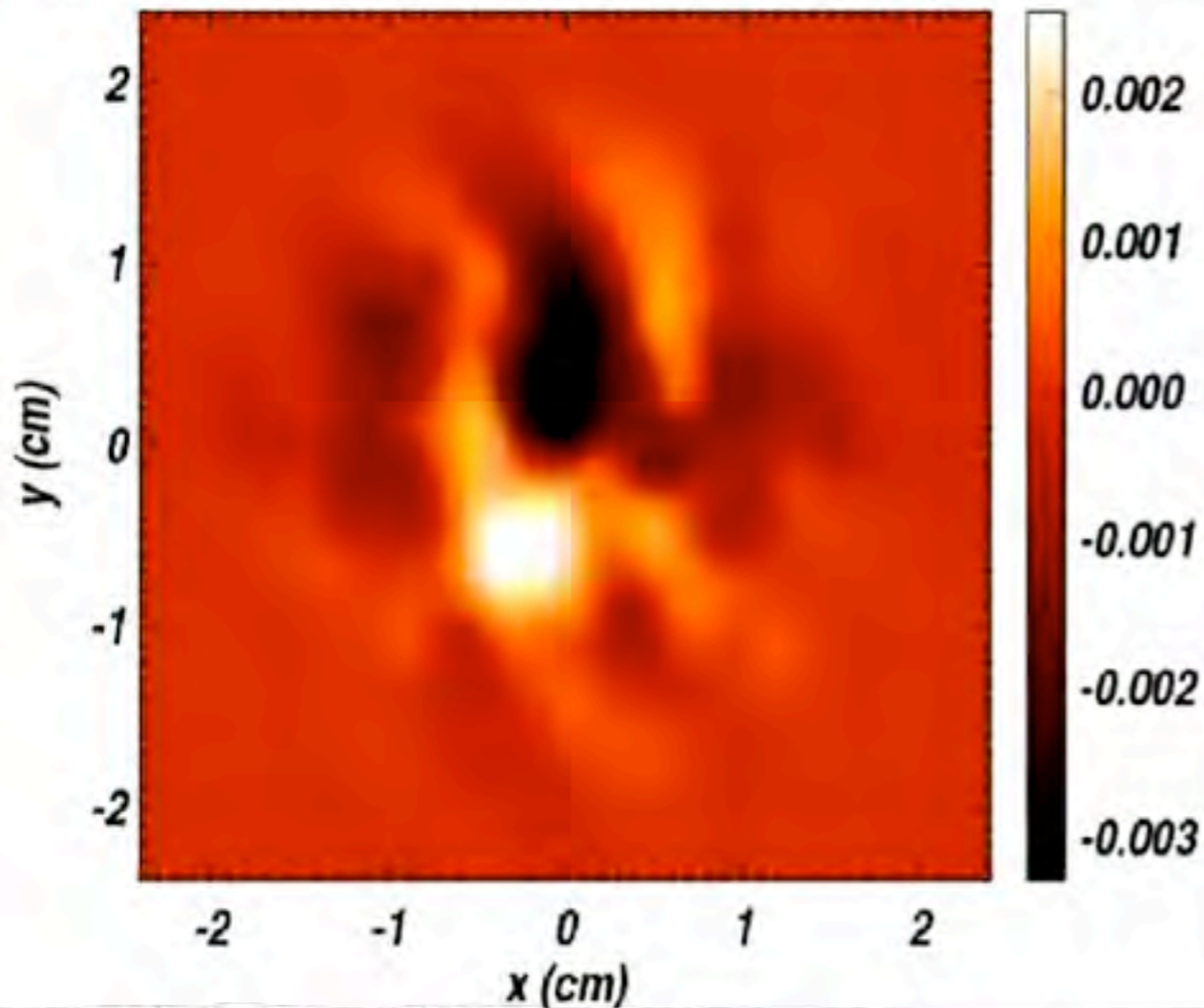
- Chaque pixel mesure une combinaison linéaire des visibilités avec un déphasage différent
- En variant les déphaseurs on multiplie les configurations (multiplexage temporel) :
➔ toutes les visibilités sont reconstruites de manière optimale

[Charlassier et al., arxiv:0806.0380, A&A 497-3 (2009) 963-971]

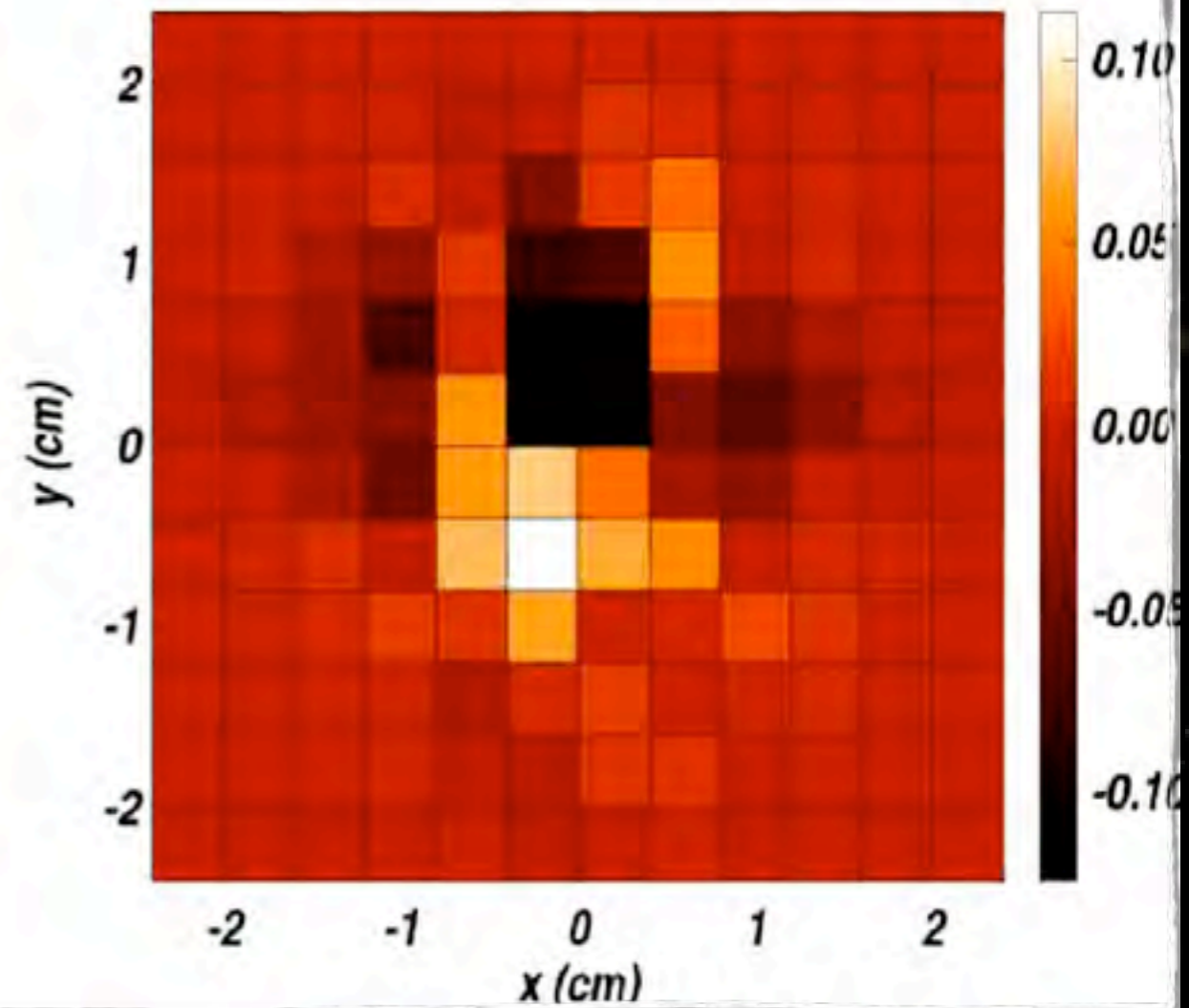


64 cornets: Image sur la matrice de bolomètres

Résolution infinie



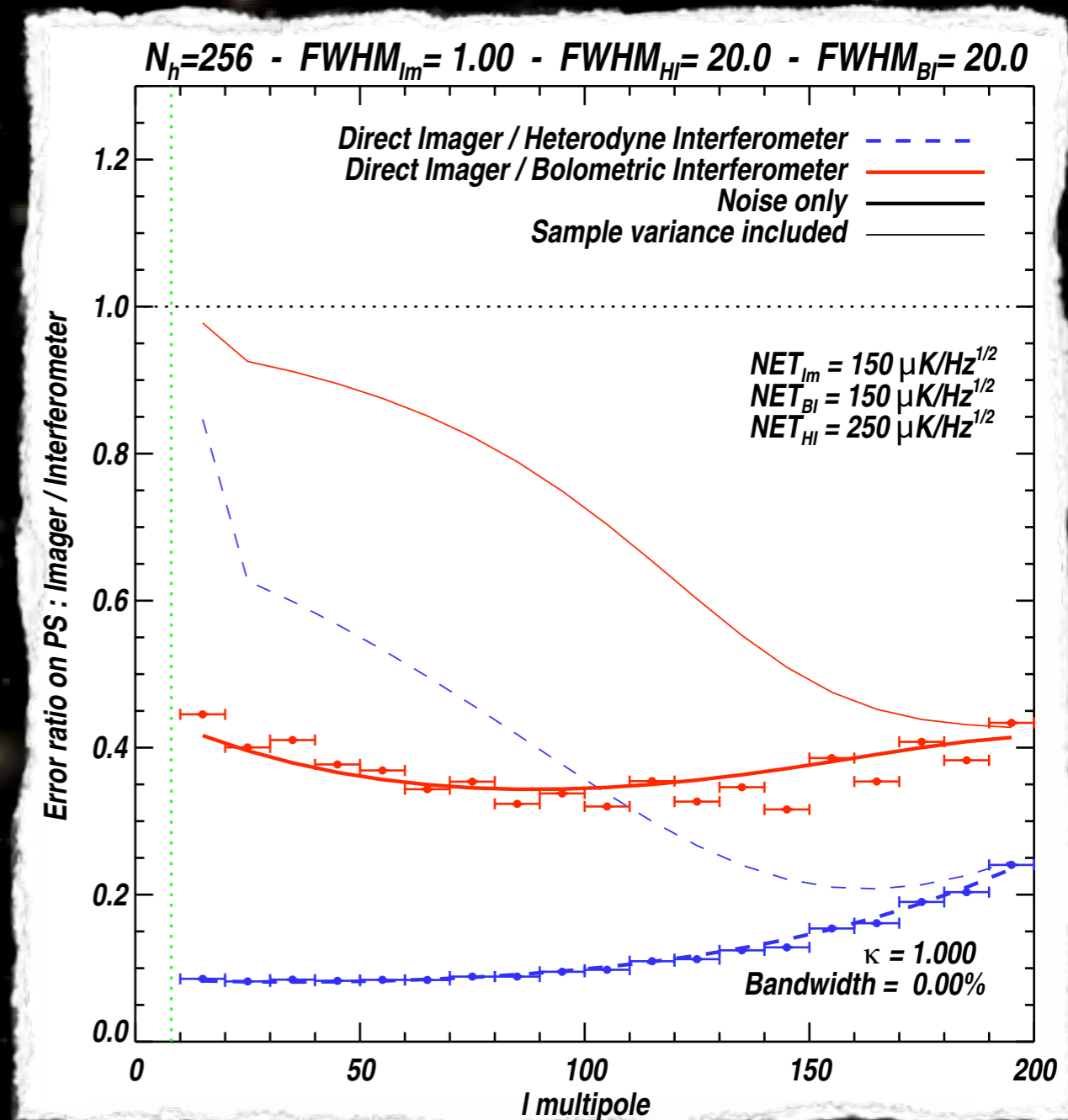
144 bolomètres



Plus il y a de cornets, plus les détails sont fins (lignes de base plus grandes)

Sensibilités comparées

- Par rapport à un imageur:
 - La sensibilité intrinsèque est réduite (~60%)
 - Si l'on tient compte de la «variance d'échantillon» la différence est réduite
 - Cette différence est le «prix à payer» pour la réduction des systématiques
 - En fait, la NET devrait être réduite (~25%) pour BI (plus de bolomètres par cornet)
- Par rapport à un interféromètre hétérodyne:
 - Sensibilité intrinsèque améliorée d'un facteur 2
 - La NET sera toujours meilleure avec des bolomètres qu'avec une détection cohérente (bruit ajouté par l'amplification)



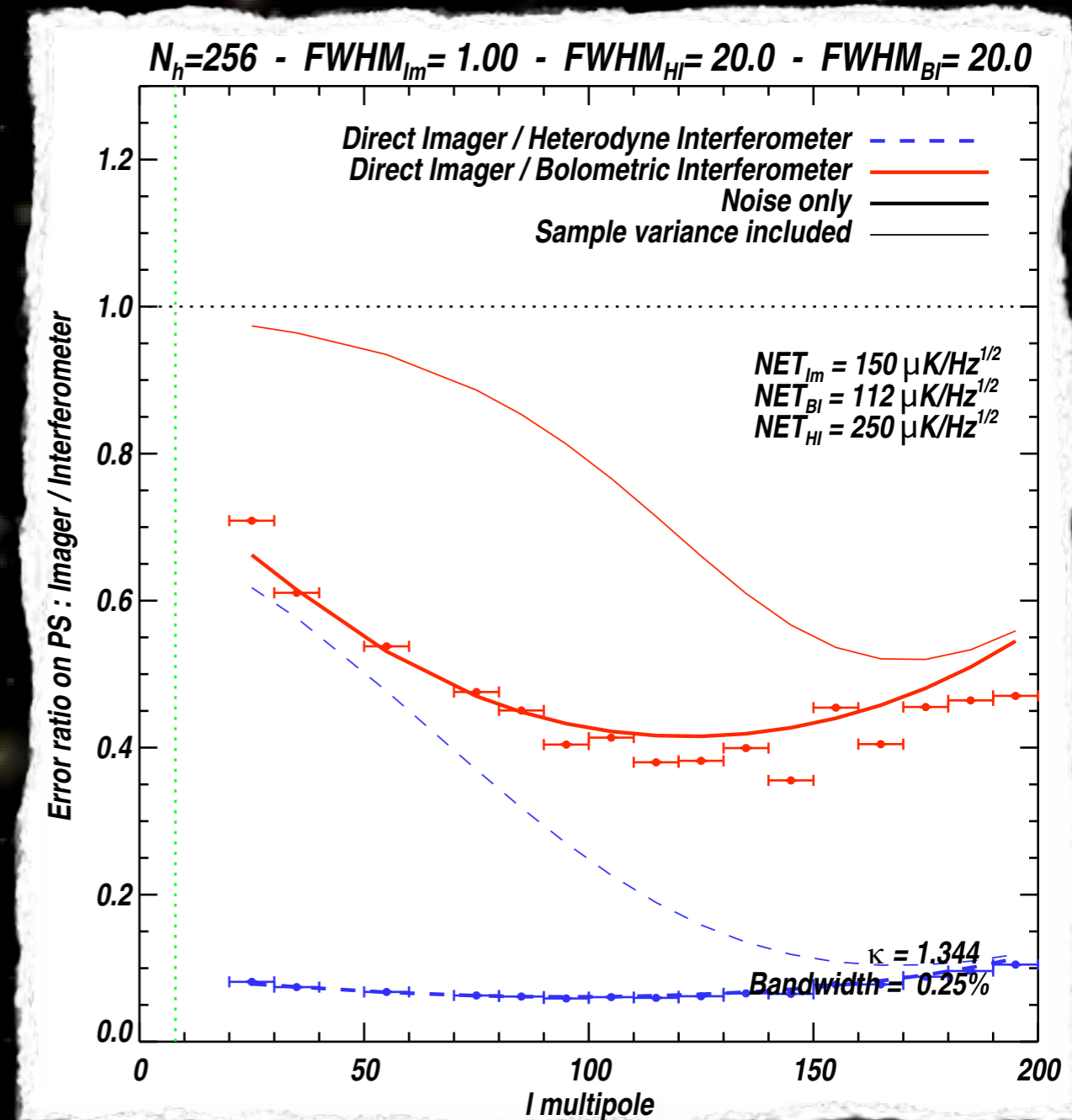
[Hamilton et al., arxiv:0807.0438, A&A 491-3 (2008) 923-927]
(updated with Bandwidth and accurate NET calculations)

Nous avons réussi (sur le papier) à combiner les avantages !



Sensibilités comparées

- Par rapport à un imageur:
 - La sensibilité intrinsèque est réduite (~60%)
 - Si l'on tient compte de la «variance d'échantillon» la différence est réduite
 - Cette différences est le «prix à payer» pour la réduction des systématiques
 - En fait, la NET devrait être réduite (~25%) pour BI (plus de bolomètres par cornet)
- Par rapport à un interféromètre hétérodyne:
 - Sensibilité intrinsèque améliorée d'un facteur 2
 - La NET sera toujours meilleure avec des bolomètres qu'avec une détection cohérente (bruit ajouté par l'amplification)



[Hamilton et al., arxiv:0807.0438, A&A 491-3 (2008) 923-927]
(updated with Bandwidth and accurate NET calculations)

Nous avons réussi (sur le papier) à combiner les avantages !



Calculs de bruit

Hypothèse : $NEP_{\text{bolo}} = 1.5 \times 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 300 mK et $1.5 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 mK [M. Piat]

28	Cold optics Temperature	K	4	Cold optics Temperature	K	4
29	Focal plane temperature	mK	300	Focal Plane Temperature	mK	300
30						
31						
32	CMB Power on one horn	W	2,1E-13	CMB Power on one horn	W	2,1E-13
33	CMB Power on all horns	W	3,0E-11	CMB Power on all horns	W	3,0E-11
34						
35	Atmosphere T	K	240	Atmosphere T	K	240
36	Atmosphere Emissivity		0,05	Atmosphere Emissivity		0,05
37	Atmosphere P on one horn	W	2,2E-12	Atmosphere P on one horn	W	2,2E-12
38	Atmosphere P on all horns	W	3,2E-10	Atmosphere P on all horns	W	3,2E-10
39						
40	Window T	K	240	Window T	K	240
41	Window emissivity		0,02	Window emissivity		0,02
42	P window in one horn	W	8,9E-13	P window in one horn	W	8,9E-13
43	P window total	W	1,3E-10	P window total	W	1,3E-10
44						
45	Filters T	K	77	Filters T	K	77
46	Filters Emissivity		0,01	Filters Emissivity		0,01
47	P filters in one horn	W	1,4E-13	P filters in one horn	W	1,4E-13
48	P filters total	W	2,0E-11	P filters total	W	2,0E-11
49						
50	Horns T	K	4	Horns T	K	4
51	Horns Emissivity		0,2	Horns Emissivity		0,2
52	P from one sec horn	W	8,3E-14	P from one horn	W	8,3E-14
53	P from all sec. horns	W	2,4E-11	P from all horns	W	1,2E-11
54						
55	Mirrors T	K	4	Mirrors T	K	240
56	Mirrors Emissivity		0,01	Mirrors Emissivity		0,01
57	P on each bol	W	4,1E-15	P on each bol	W	4,4E-13
58	P on the whole array	W	3,3E-12	P on the whole array	W	6,4E-11
59						
60	P total on the array	W	5,2E-10	P total on the array	W	5,7E-10
61	P per bolometer	W	6,7E-13	P per bolometer	W	2,0E-12
62	Photons shot noise	W/Sqrt(Hz)	8,9E-18	Photons shot noise	W/Sqrt(Hz)	1,5E-17
63	Photons Bunching noise	W/Sqrt(Hz)	6,3E-18	Photons Bunching noise	W/Sqrt(Hz)	1,9E-17
64	NEP Photons	W/Sqrt(Hz)	1,1E-17	NEP Photons	W/Sqrt(Hz)	2,4E-17
65	NEP Bolo	W/Sqrt(Hz)	1,5E-17	NEP Bolo	W/Sqrt(Hz)	1,5E-17
66	NEP Tot	W/Sqrt(Hz)	1,9E-17	NEP Tot	W/Sqrt(Hz)	2,9E-17
67						
68	NET for one single bolo	muK.sqrt(s)	87	NET for one single bolo	muK.sqrt(s)	133
69	NET * SQRT(NBolo)/Sqrt(Nh)	muK.sqrt(s)	202	NET * SQRT(NBolo)/Sqrt(Nh)	muK.sqrt(s)	188
70	Ratio to imager		1,07			
71	Ratio^2 to imager		1,15			



Calculs de bruit

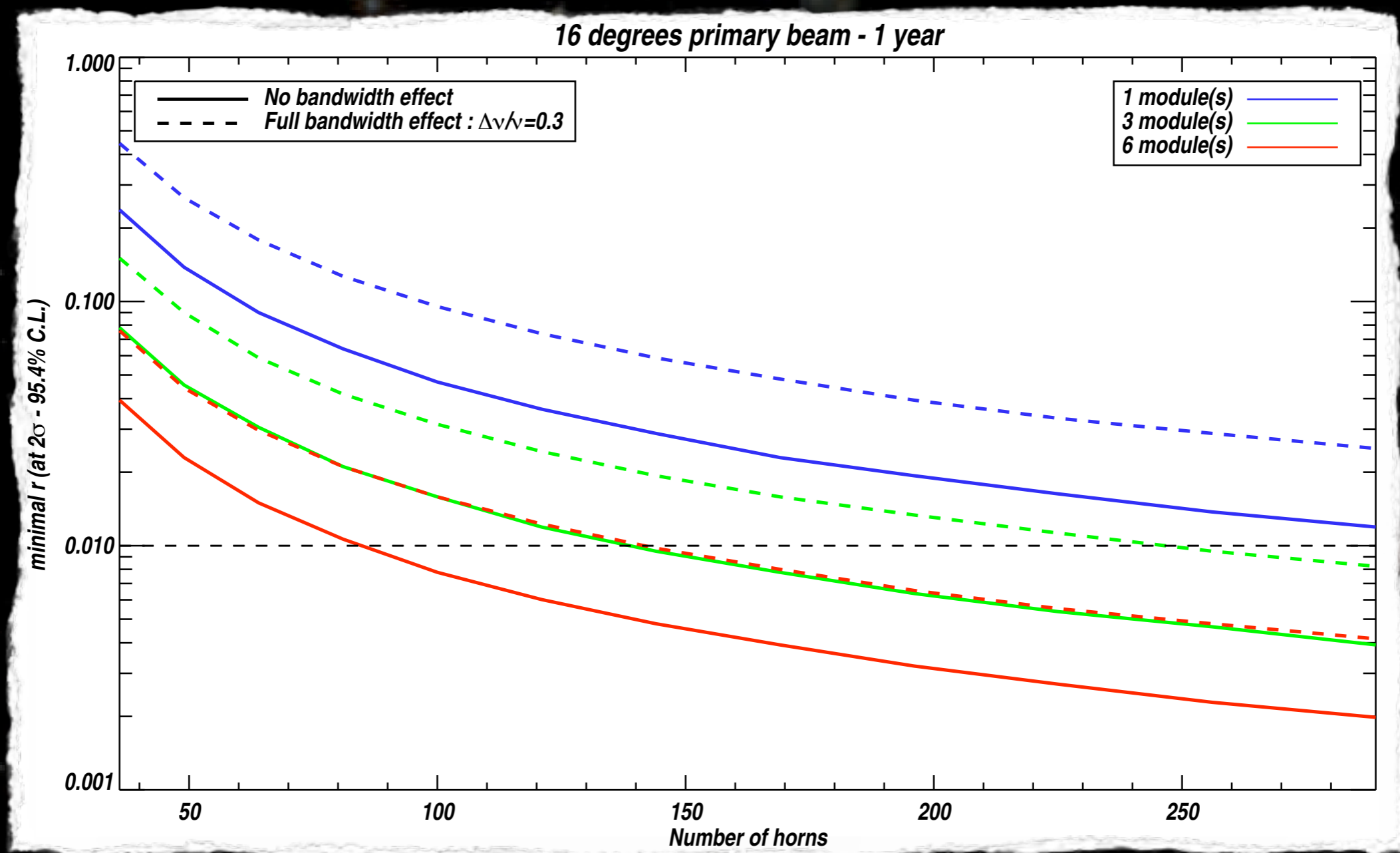
Hypothèse : $NEP_{\text{bolo}} = 1.5 \times 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 300 mK et $1.5 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 mK [M. Piat]

28	Cold optics Temperature	K	4	Cold optics Temperature	K	4
29	Focal plane temperature	mK	100	Focal Plane Temperature	mK	100
30						
31						
32	CMB Power on one horn	W	2,1E-13	CMB Power on one horn	W	2,1E-13
33	CMB Power on all horns	W	3,0E-11	CMB Power on all horns	W	3,0E-11
34						
35	Atmosphere T	K	240	Atmosphere T	K	240
36	Atmosphere Emissivity		0,05	Atmosphere Emissivity		0,05
37	Atmosphere P on one horn	W	2,2E-12	Atmosphere P on one horn	W	2,2E-12
38	Atmosphere P on all horns	W	3,2E-10	Atmosphere P on all horns	W	3,2E-10
39						
40	Window T	K	240	Window T	K	240
41	Window emissivity		0,02	Window emissivity		0,02
42	P window in one horn	W	8,9E-13	P window in one horn	W	8,9E-13
43	P window total	W	1,3E-10	P window total	W	1,3E-10
44						
45	Filters T	K	77	Filters T	K	77
46	Filters Emissivity		0,01	Filters Emissivity		0,01
47	P filters in one horn	W	1,4E-13	P filters in one horn	W	1,4E-13
48	P filters total	W	2,0E-11	P filters total	W	2,0E-11
49						
50	Horns T	K	4	Horns T	K	4
51	Horns Emissivity		0,2	Horns Emissivity		0,2
52	P from one sec horn	W	8,3E-14	P from one horn	W	8,3E-14
53	P from all sec. horns	W	2,4E-11	P from all horns	W	1,2E-11
54						
55	Mirrors T	K	4	Mirrors T	K	240
56	Mirrors Emissivity		0,01	Mirrors Emissivity		0,01
57	P on each bol	W	4,1E-15	P on each bol	W	4,4E-13
58	P on the whole array	W	3,3E-12	P on the whole array	W	6,4E-11
59						
60	P total on the array	W	5,2E-10	P total on the array	W	5,7E-10
61	P per bolometer	W	6,7E-13	P per bolometer	W	2,0E-12
62	Photons shot noise	W/Sqrt(Hz)	8,9E-18	Photons shot noise	W/Sqrt(Hz)	1,5E-17
63	Photons Bunching noise	W/Sqrt(Hz)	6,3E-18	Photons Bunching noise	W/Sqrt(Hz)	1,9E-17
64	NEP Photons	W/Sqrt(Hz)	1,1E-17	NEP Photons	W/Sqrt(Hz)	2,4E-17
65	NEP Bolo	W/Sqrt(Hz)	1,5E-18	NEP Bolo	W/Sqrt(Hz)	1,5E-18
66	NEP Tot	W/Sqrt(Hz)	1,1E-17	NEP Tot	W/Sqrt(Hz)	2,4E-17
67						
68	NET for one single bolo	muK.sqrt(s)	52	NET for one single bolo	muK.sqrt(s)	114
69	NET * SQRT(NBolo)/sqrt(Nh)	muK.sqrt(s)	120	NET * SQRT(NBolo)/sqrt(Nh)	muK.sqrt(s)	161
70	Ratio to imager		0,75			
71	Ratio^2 to imager		0,56			



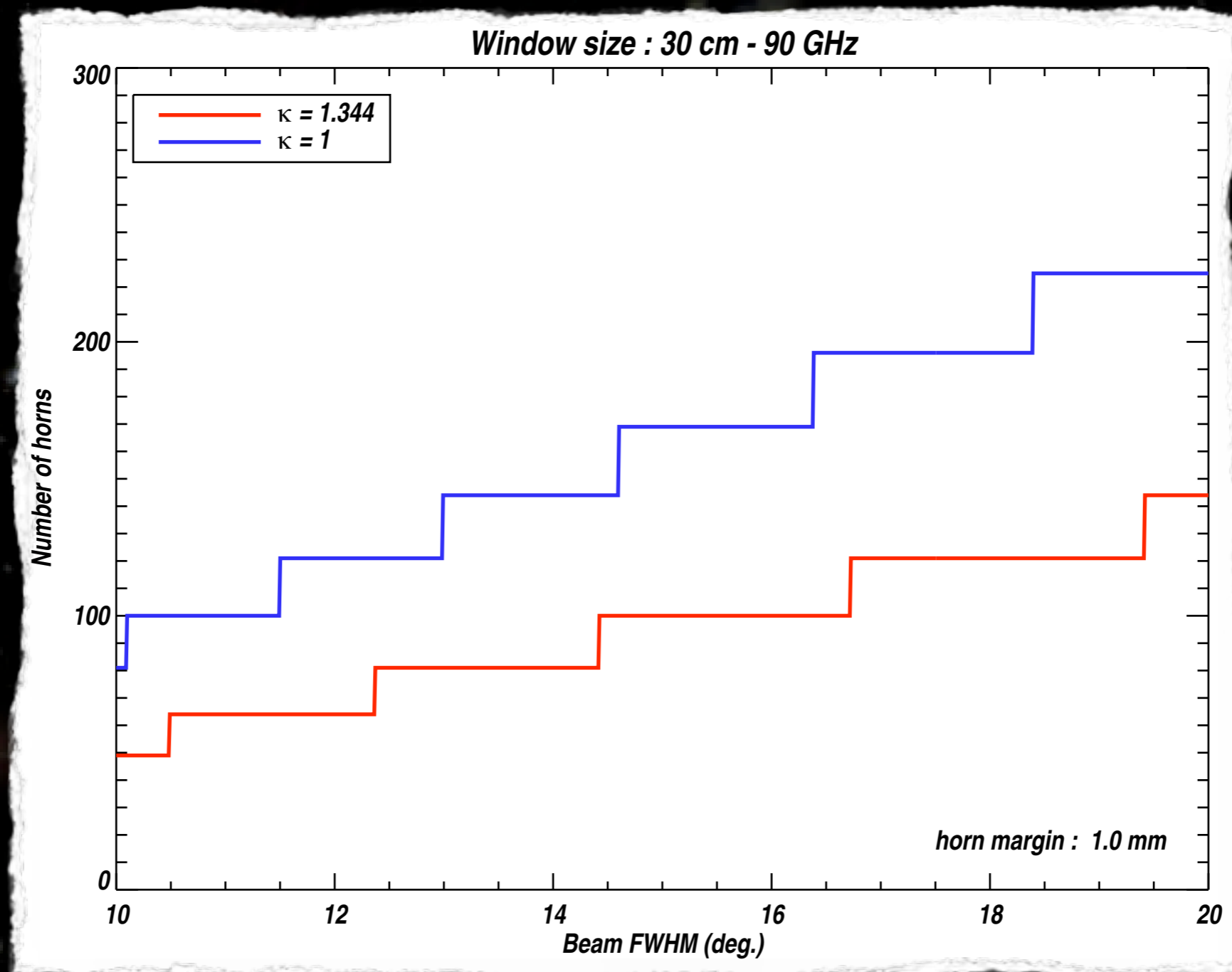
Dimensionnement de QUBIC

Nombre de cornets



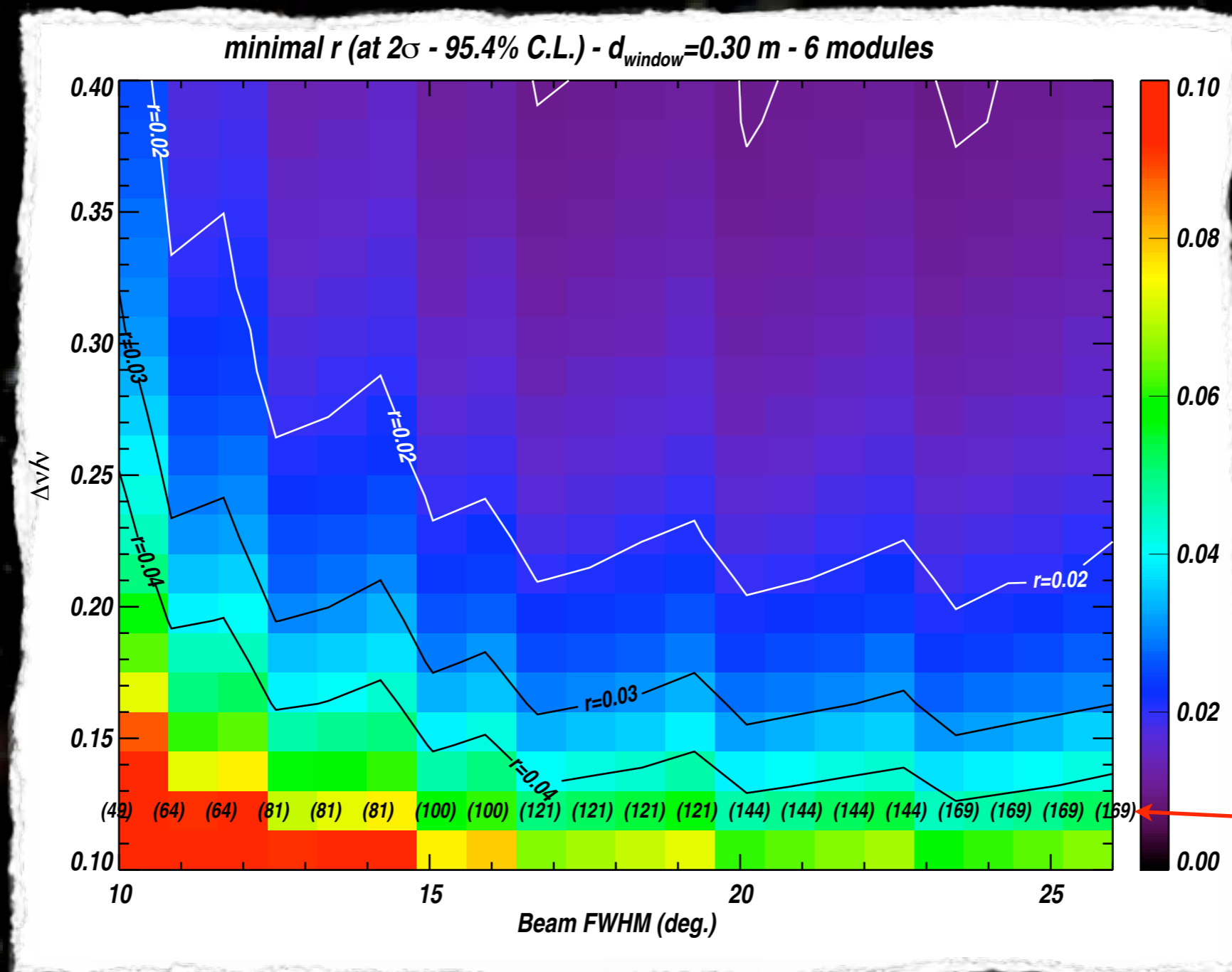
Dimensionnement de QUBIC

Taille du champ de vue des cornets



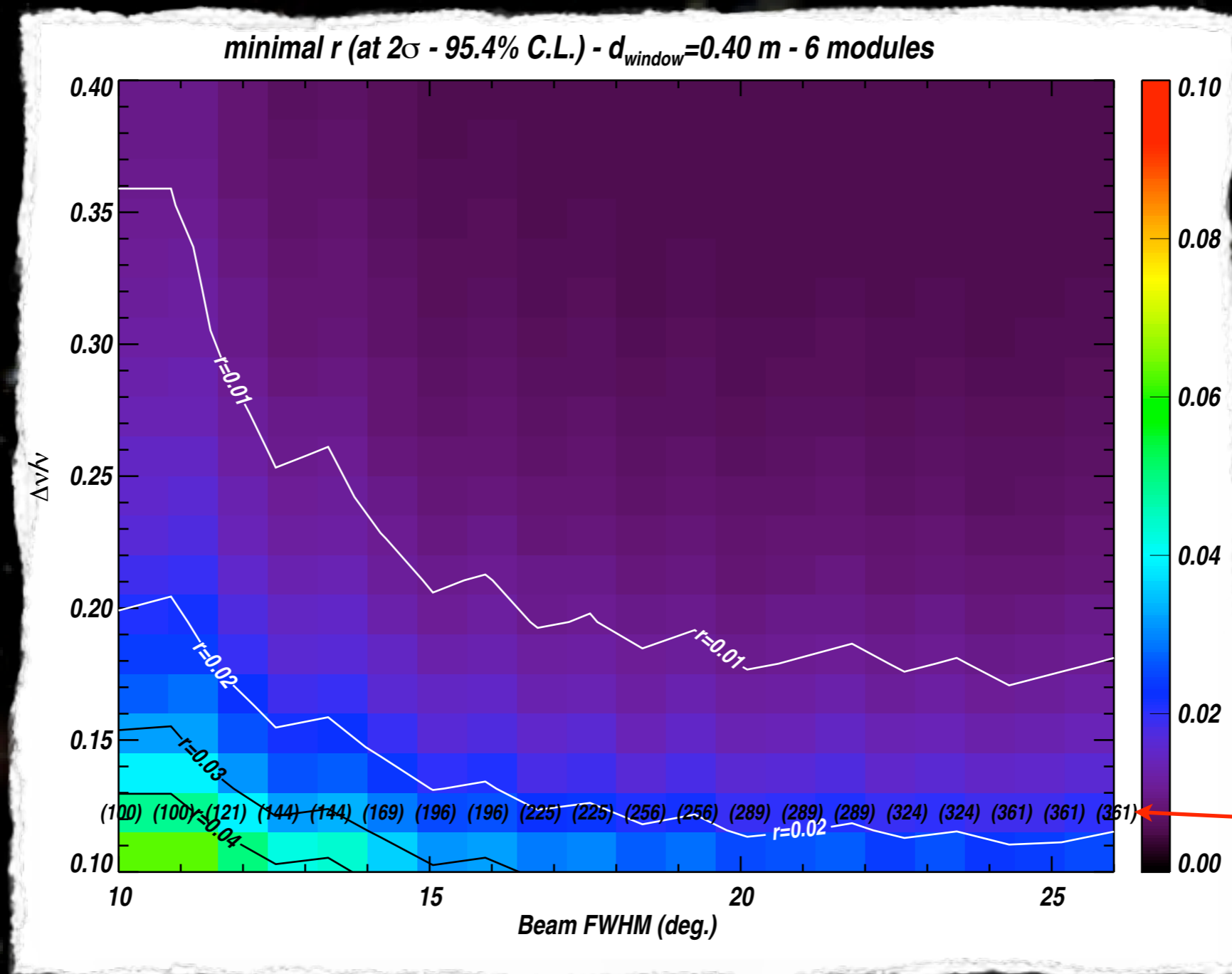
Dimensionnement de QUBIC

Champ de vue, nombre de cornets et bandwidth



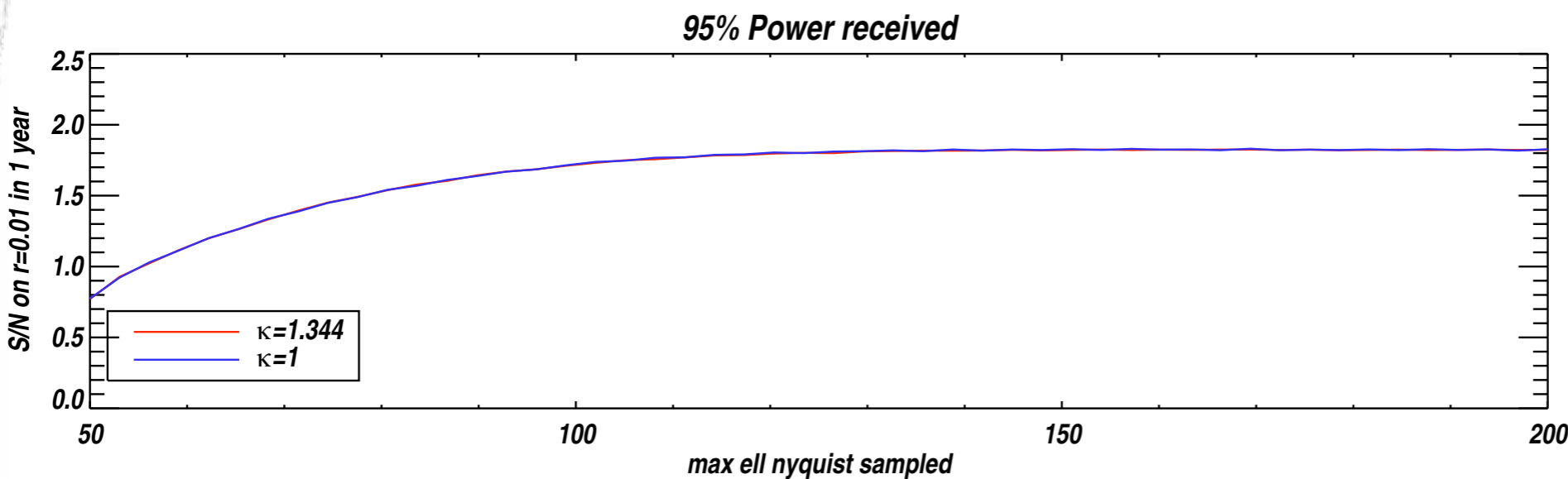
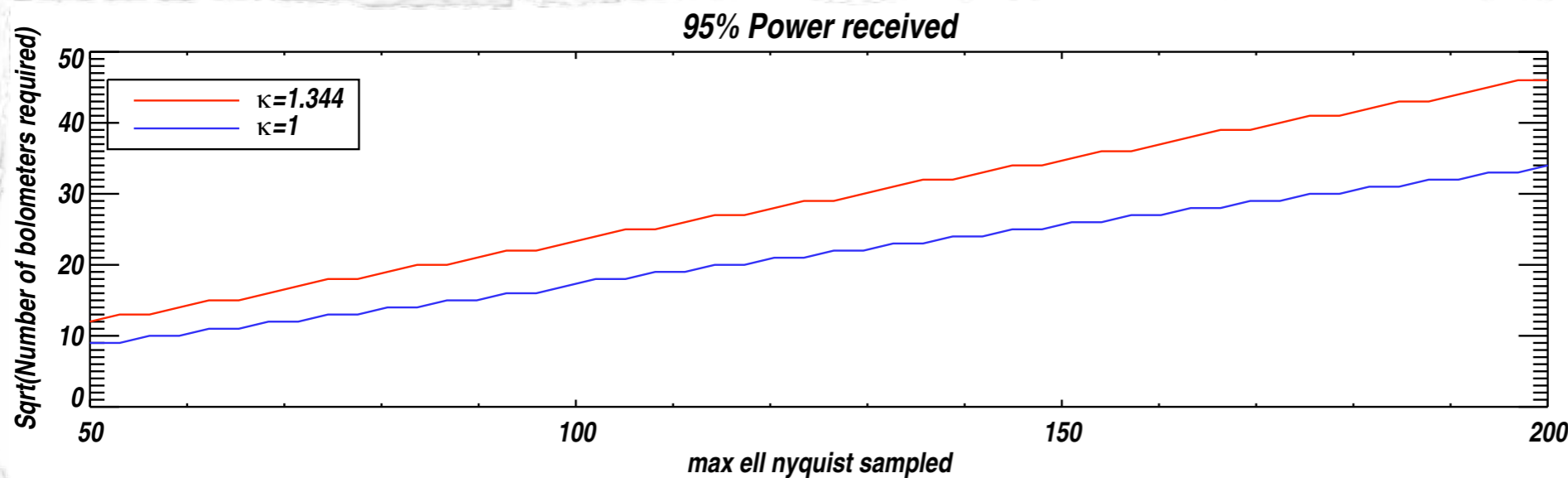
Dimensionnement de QUBIC

Champ de vue, nombre de cornets et bandwidth



Dimensionnement de QUBIC

Nombre de bolomètres



n_s	ℓ_{\max}	κ_{sec}	$\sqrt{N_{\text{bol}}}$	N_{bol}
3	200	1.344	67	4489
3	200	1.000	50	2500
2	200	1.344	45	2025
2	200	1.000	33	1089
3	150	1.344	50	2500
3	150	1.000	37	1369
2	150	1.344	34	1156
2	150	1.000	25	625
3	125	1.344	42	1764
3	125	1.000	31	961
2	125	1.344	28	784
2	125	1.000	21	441

$$\kappa^2 = \frac{S\Omega}{\lambda^2}$$

ℓ_{\max}

n_s

Cornets

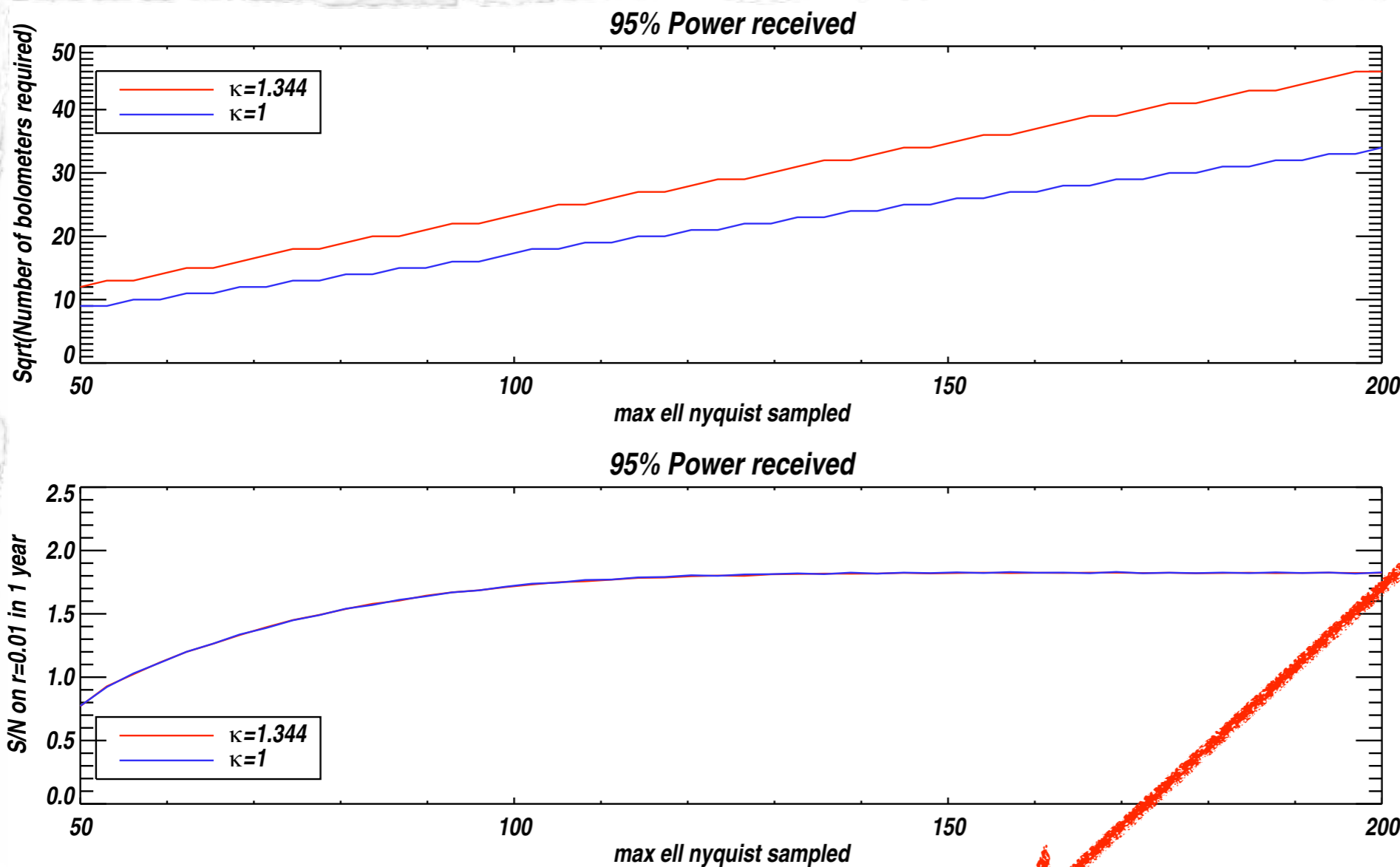
Baseline la plus fine

échantillonnage de ℓ_{\max}



Dimensionnement de QUBIC

Nombre de bolomètres



n_s	ℓ_{\max}	κ_{sec}	$\sqrt{N_{\text{bol}}}$	N_{bol}
3	200	1.344	67	4489
3	200	1.000	50	2500
2	200	1.344	45	2025
2	200	1.000	33	1089
3	150	1.344	50	2500
3	150	1.000	37	1369
2	150	1.344	34	1156
2	150	1.000	25	625
3	125	1.344	42	1764
3	125	1.000	31	961
2	125	1.344	28	784
2	125	1.000	21	441

$$\kappa^2 = \frac{S\Omega}{\lambda^2}$$

Cornets

ℓ_{\max}

Baseline la plus fine

n_s

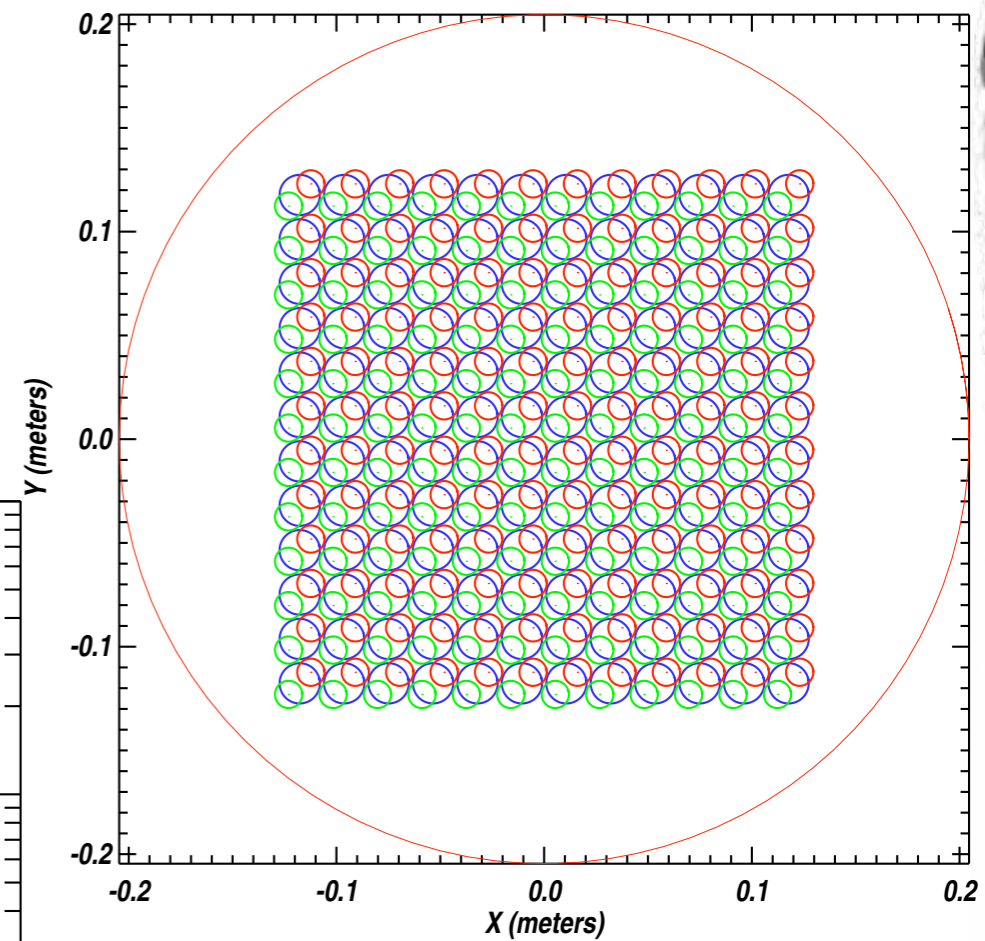
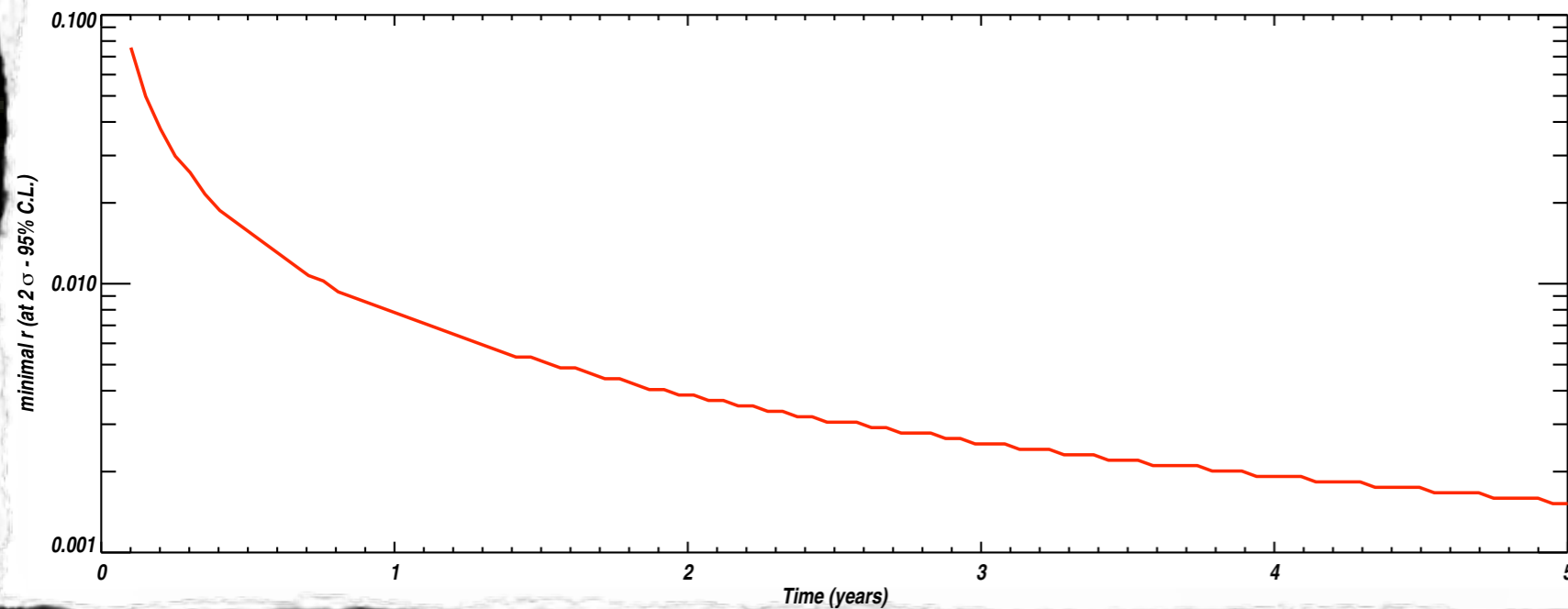
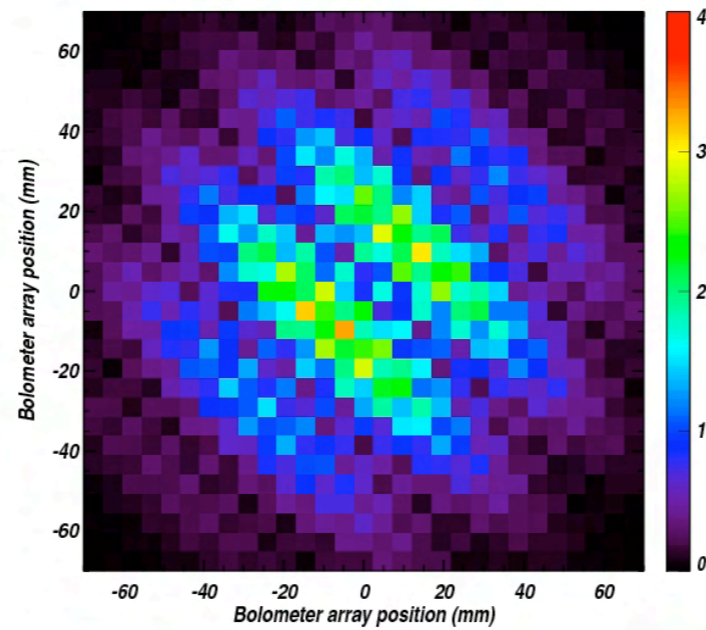
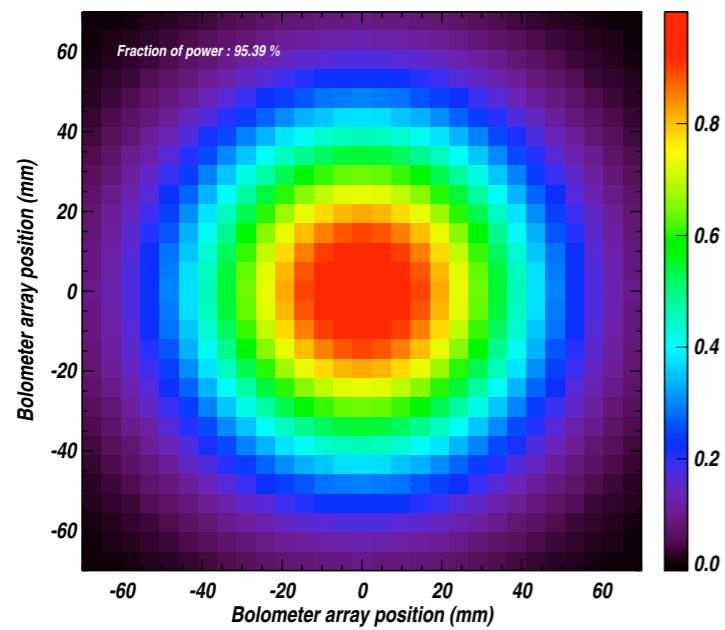
échantillonnage de ℓ_{\max}

~ 30x30 bolomètres par module



Dimensionnement de QUBIC

Design «final»



Conclusions

- La quête des modes B a commencé
- Leur détection serait la preuve directe de la phase d'inflation qui a produit les fluctuations primordiales
- La mesure de leur spectre permettrait de comprendre la physique de l'inflaton en détails
- Ceci ne sera possible qu'avec une nouvelle génération de détecteurs
 - Larges matrices de bolomètres
 - Lecture multiplexée
 - Nouveaux concepts instrumentaux (Interférométrie bolométrique ?)

