

# Anisotropies du CMB

## Résultats et perspectives



Jean-Christophe Hamilton  
APC - Paris

# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires



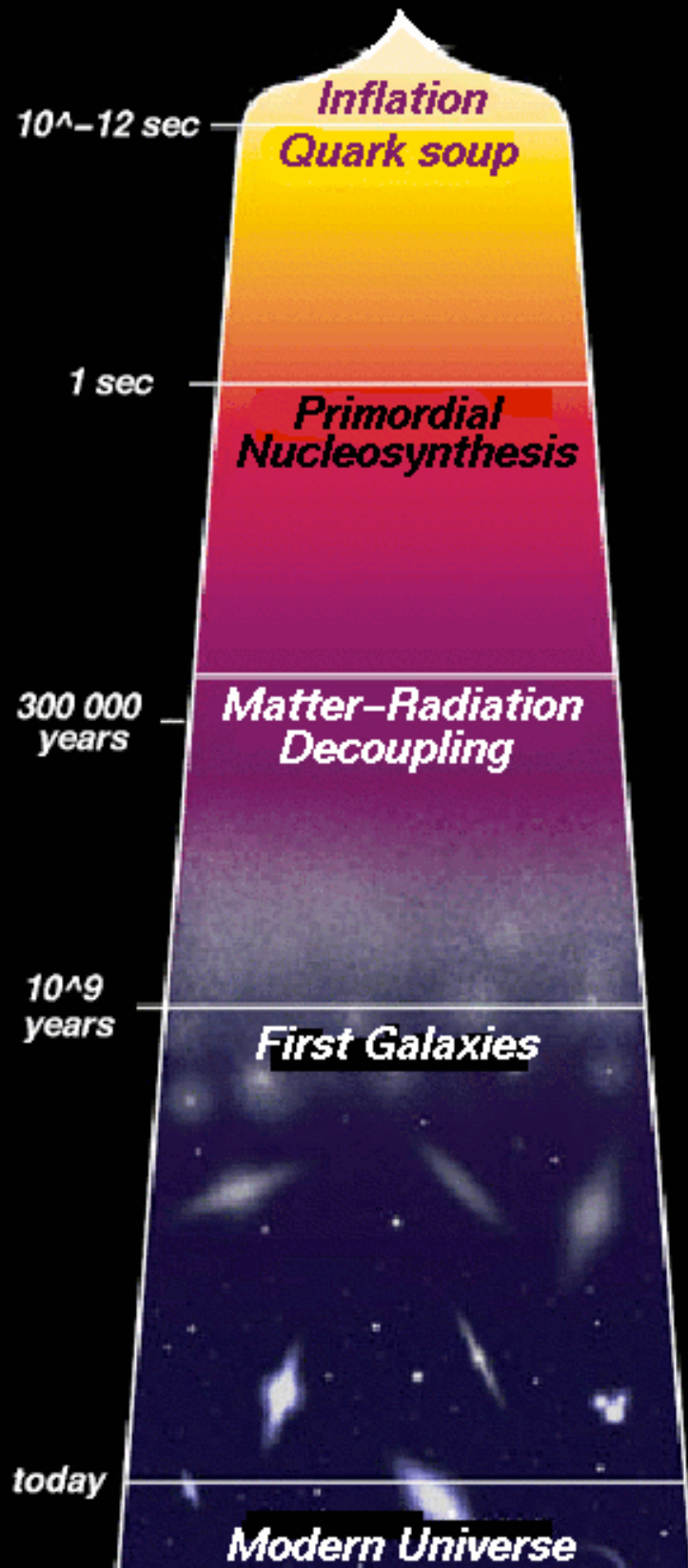
# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires





# **BIG-BANG**



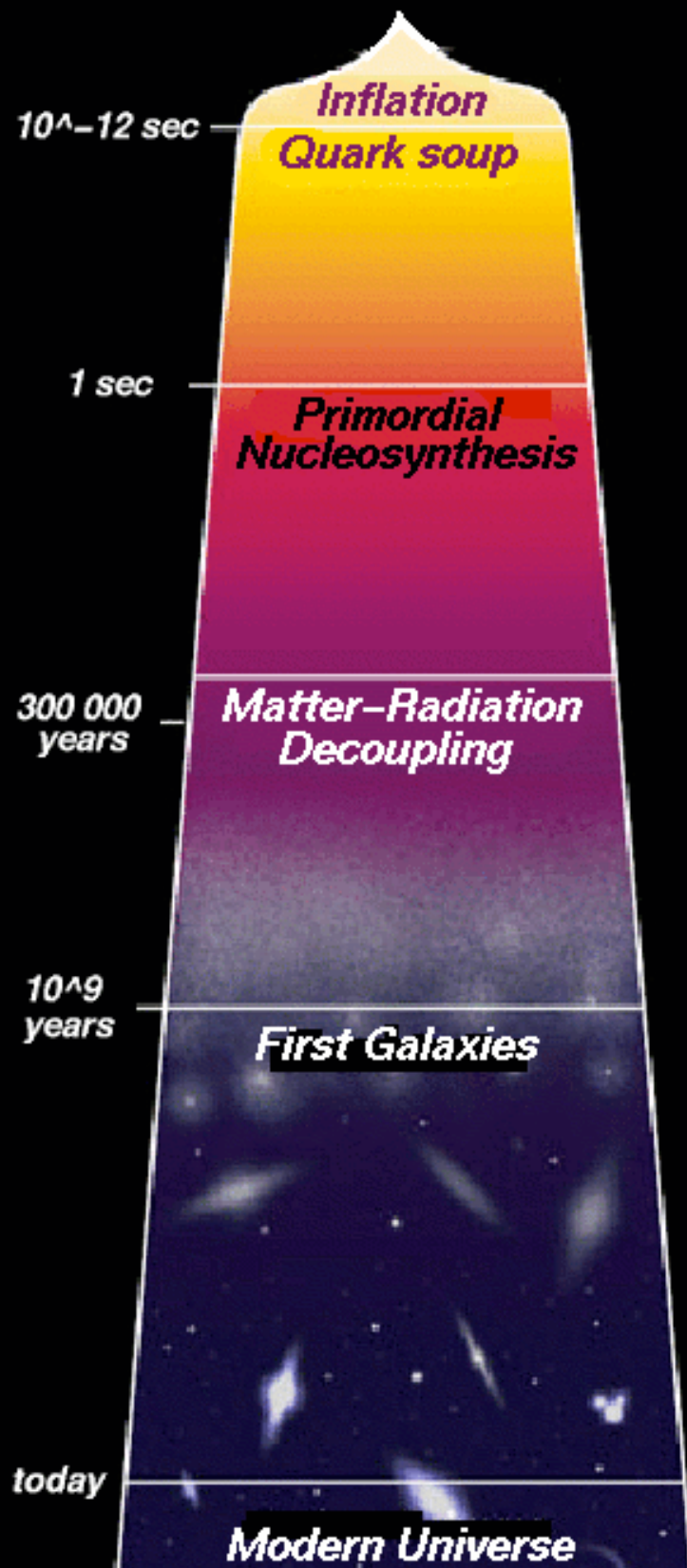
M. Kamionkowski

- **Singularité initiale ?**
  - Non décrite dans les théories actuelles
  - Supercordes ?





# **BIG-BANG**

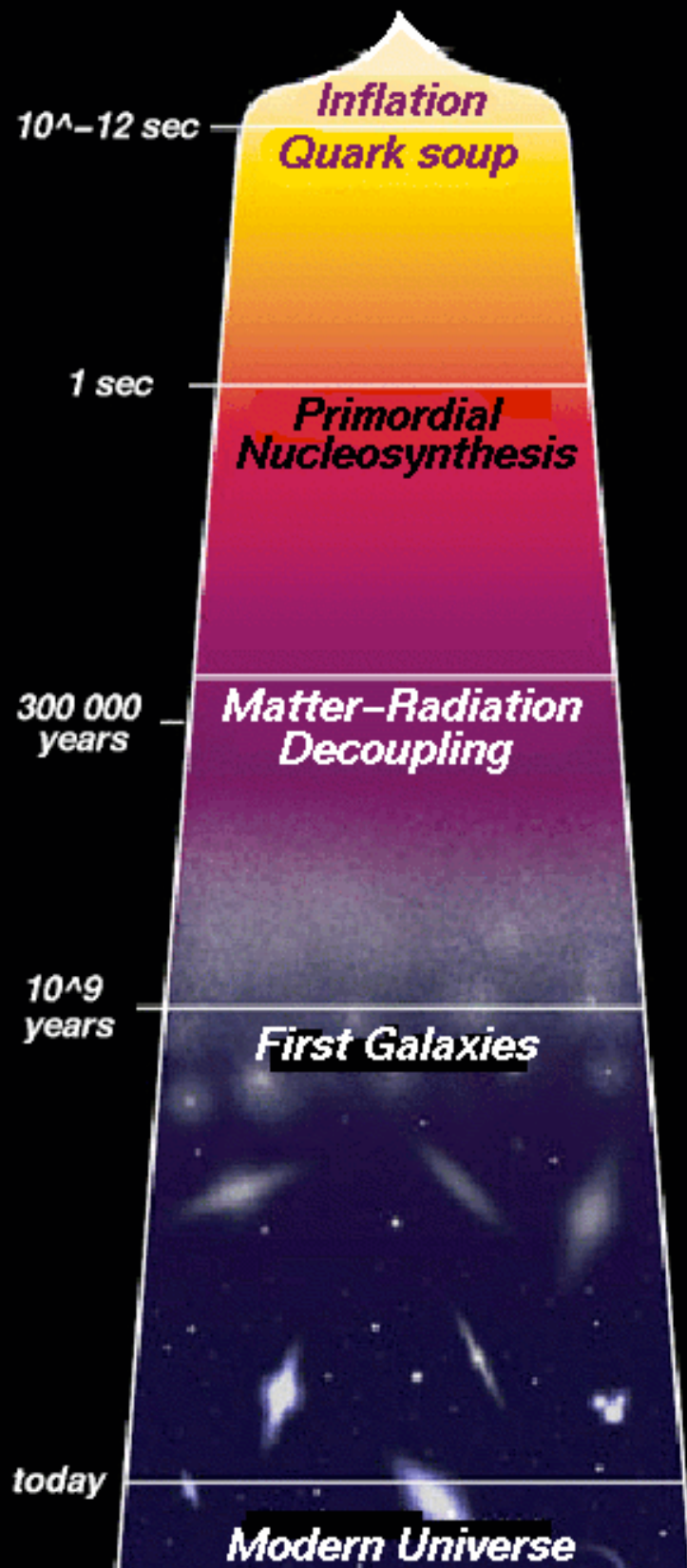


M. Kamionkowski

- Singularité initiale ?
  - Non décrite dans les théories actuelles
  - Supercordes ?
- Inflation
  - L'univers enfle démesurément



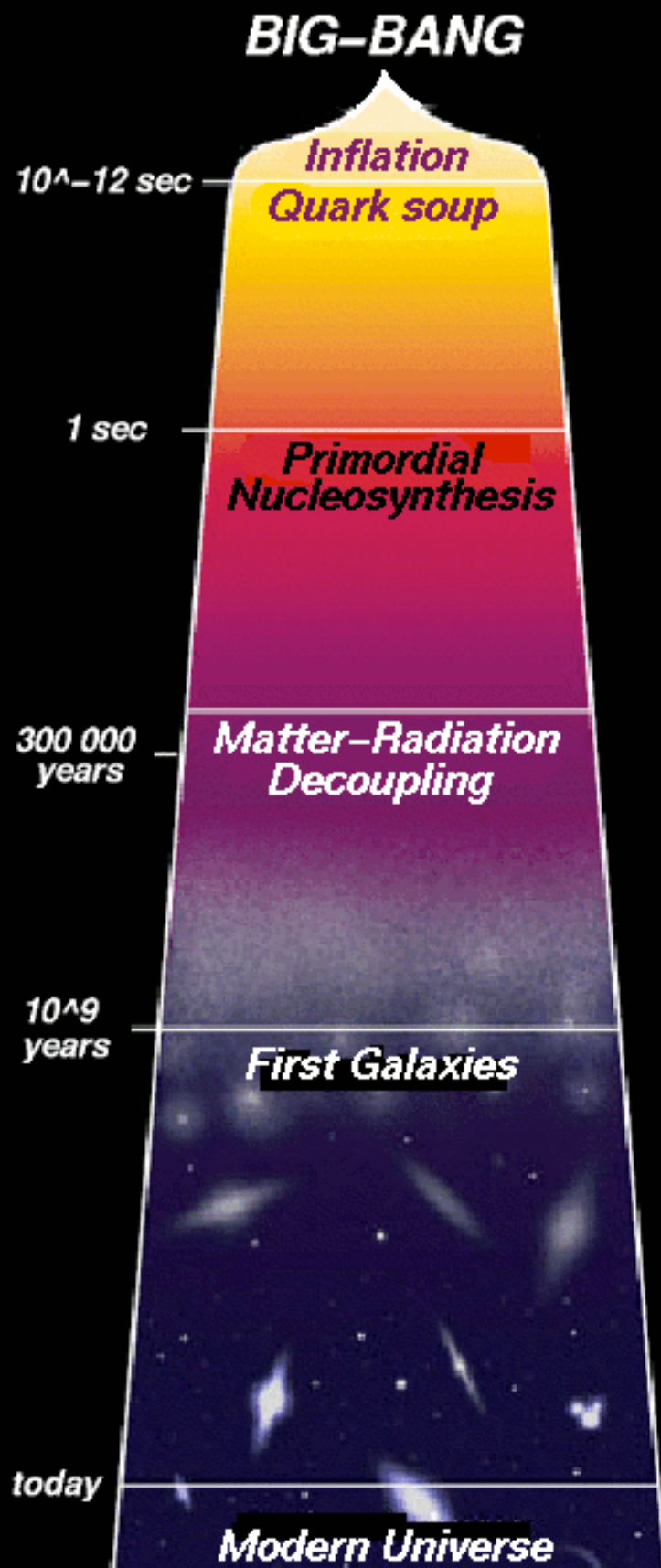
# BIG-BANG



M. Kamionkowski

- Singularité initiale ?
  - Non décrite dans les théories actuelles
  - Supercordes ?
- Inflation
  - L'univers enfle démesurément
- Nucléosynthèse primordiale
  - Formation des premiers atomes H, He, Li, Be
  - Univers toujours totalement ionisé
  - Matière et rayonnement à l'équilibre thermodynamique

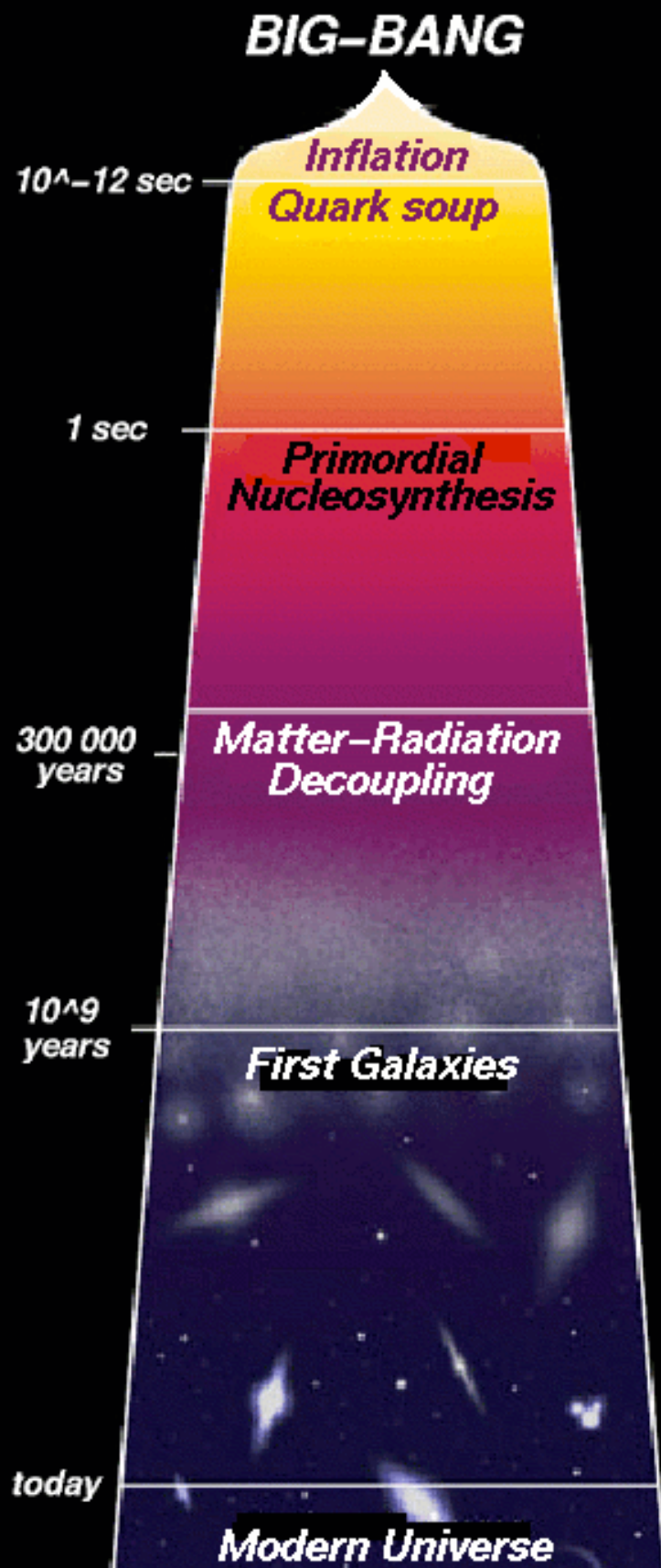




M. Kamionkowski

- Singularité initiale ?
  - Non décrite dans les théories actuelles
  - Supercordes ?
- Inflation
  - L'univers enflé démesurément
- Nucléosynthèse primordiale
  - Formation des premiers atomes H, He, Li, Be
  - Univers toujours totalement ionisé
  - Matière et rayonnement à l'équilibre thermodynamique
- $T < 13.6$  eV : les noyaux capturent les électrons





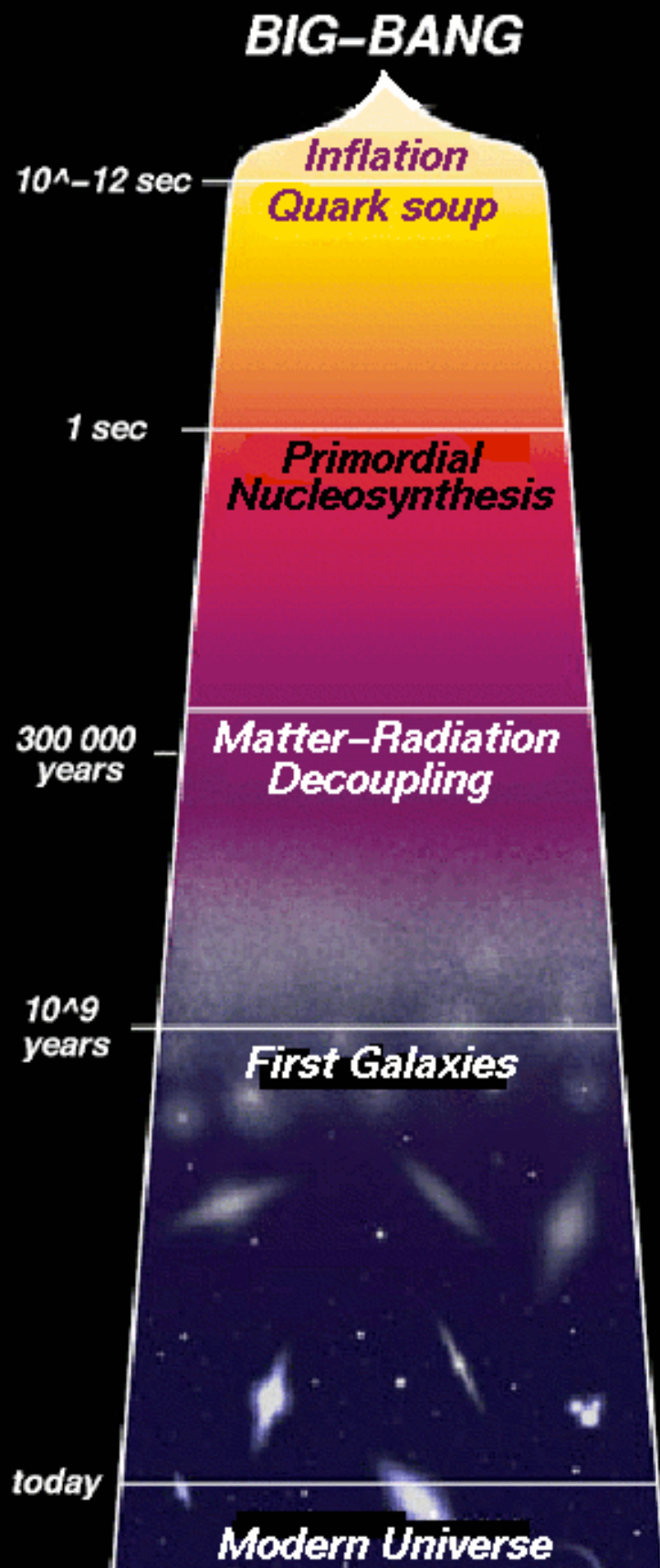
M. Kamionkowski

- **Singularité initiale ?**
  - Non décrite dans les théories actuelles
  - Supercordes ?
- **Inflation**
  - L'univers enfle démesurément
- **Nucléosynthèse primordiale**
  - Formation des premiers atomes H, He, Li, Be
  - Univers toujours totalement ionisé
  - Matière et rayonnement à l'équilibre thermodynamique
- **$T < 13.6 \text{ eV}$  : les noyaux capturent les électrons**



Photons découplés de la matière  
Emission du CMB  
 $T = 3000 \text{ K}$   
 $z = 1000$





M. Kamionkowski

- **Singularité initiale ?**
  - Non décrite dans les théories actuelles
  - Supercordes ?
- **Inflation**
  - L'univers enfle démesurément
- **Nucléosynthèse primordiale**
  - Formation des premiers atomes H, He, Li, Be
  - Univers toujours totalement ionisé
  - Matière et rayonnement à l'équilibre thermodynamique
- **$T < 13.6 \text{ eV}$  : les noyaux capturent les électrons**



Photons découplés de la matière

Emission du CMB

$T = 3000 \text{ K}$

$z = 1000$



Aujourd'hui :  $T = 2.7 \text{ K}$



# Le fond diffus cosmologique (CMB)

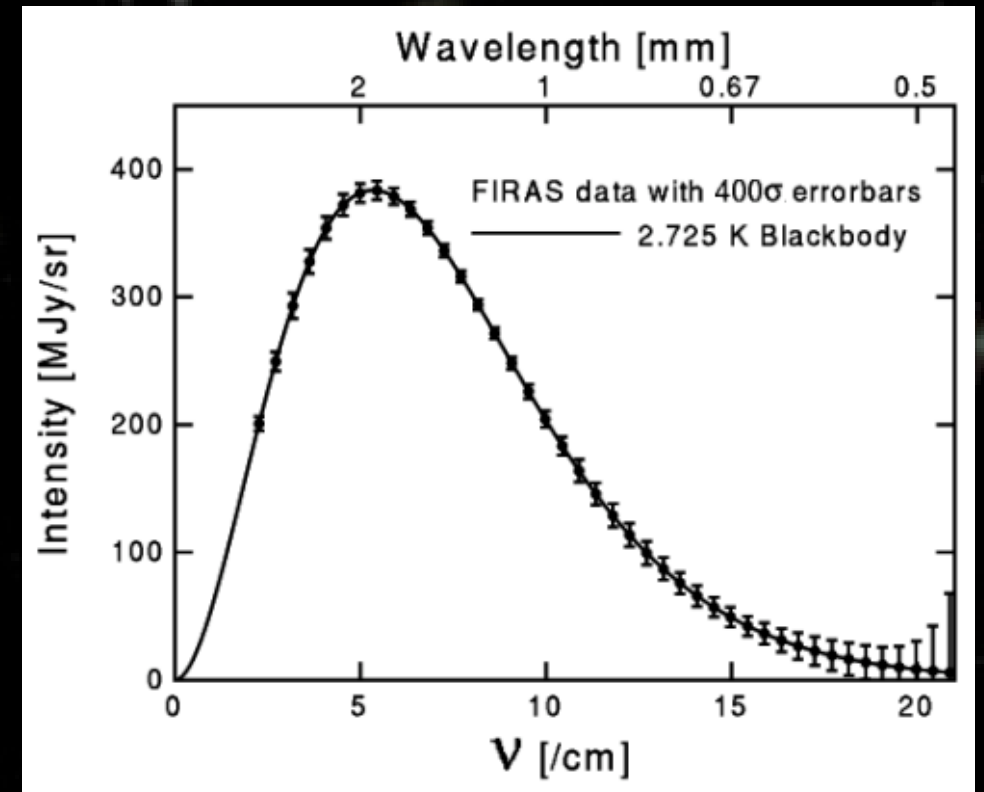
- Relique du découplage matière-rayonnement
  - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
  - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
  - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
  - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
  - ★ 400 photons/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
  - ★ 1978 : Penzias & Wilson
  - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE



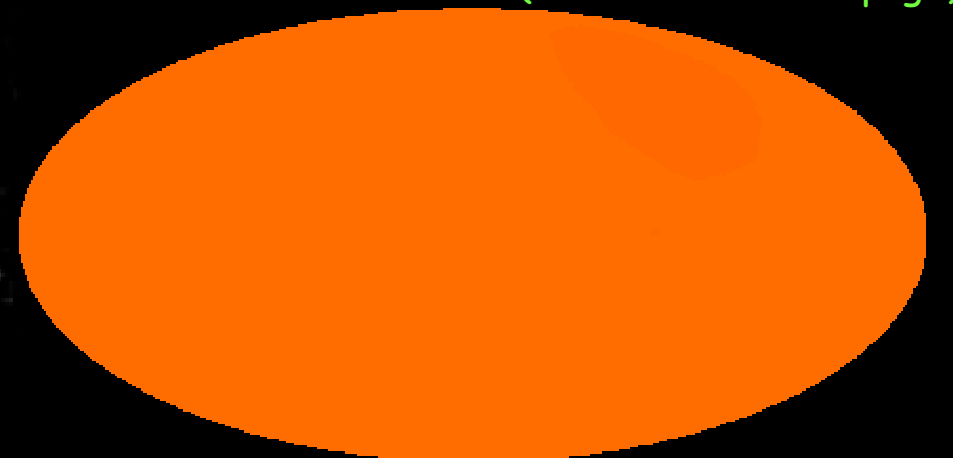


# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
  - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
  - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
  - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
  - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
  - ★ 400 photons/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
  - ★ 1978 : Penzias & Wilson
  - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

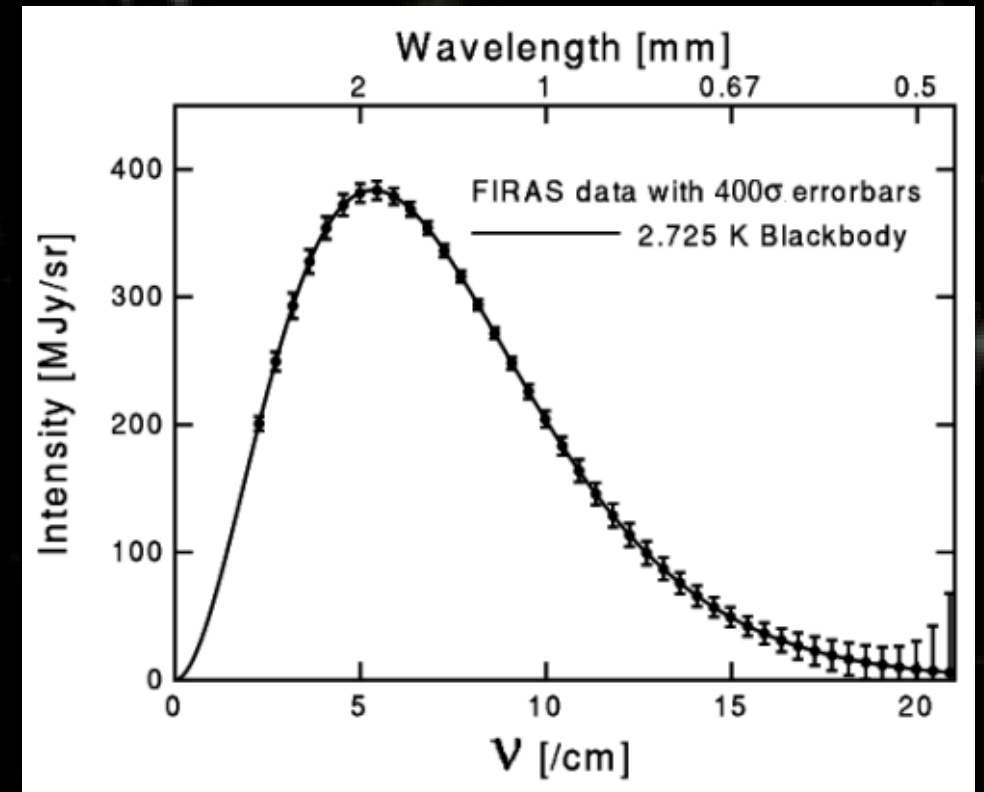


(COBE/DMR homepage)

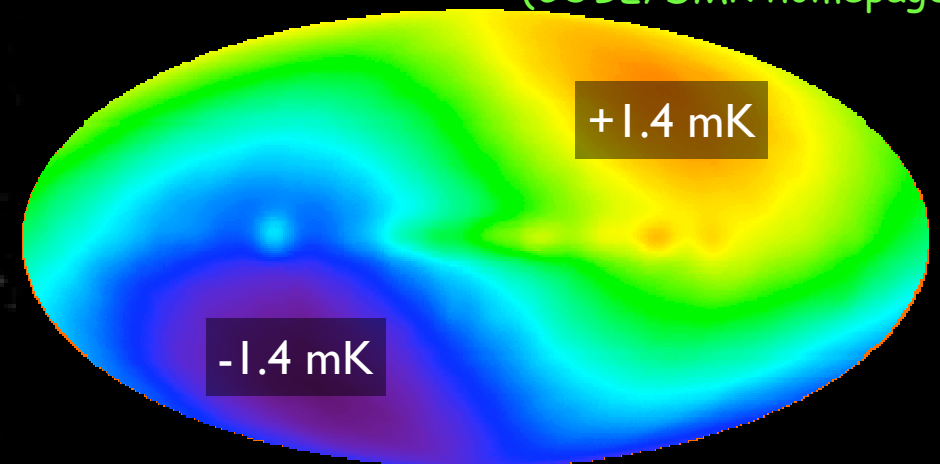


# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
  - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
  - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
  - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
  - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
  - ★  $400 \text{ photons/cm}^3$
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
  - ★ 1978 : Penzias & Wilson
  - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

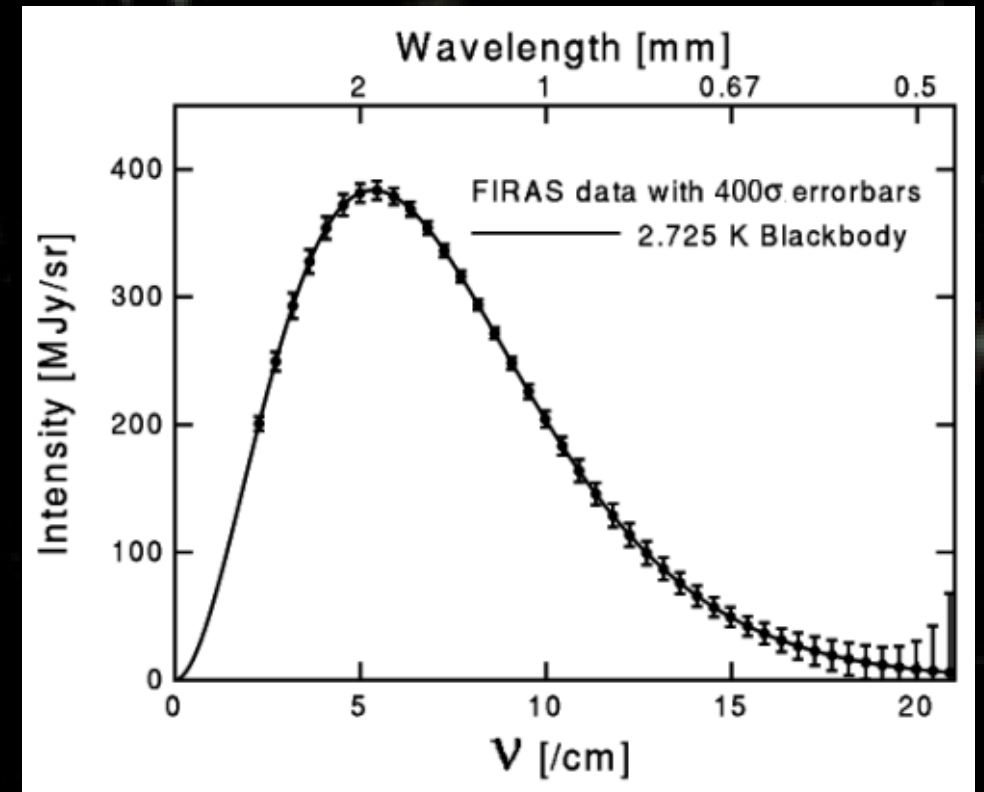


(COBE/DMR homepage)

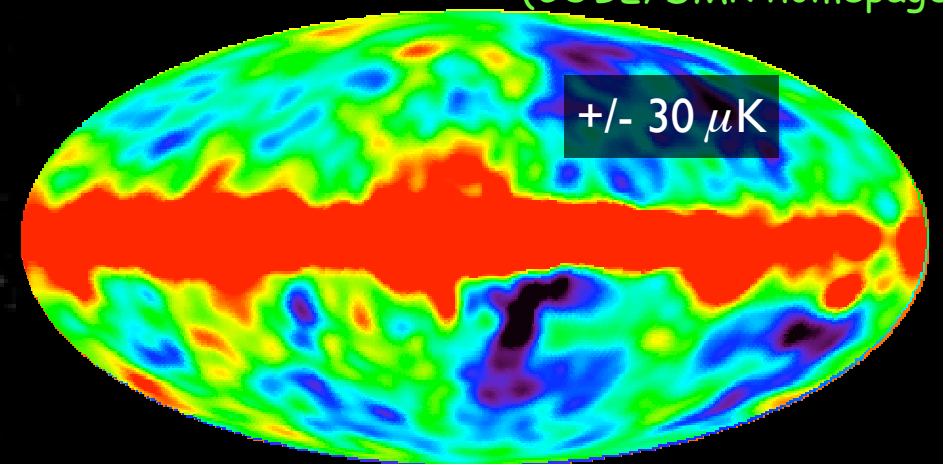


# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
  - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
  - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
  - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
  - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
  - ★ 400 photons/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
  - ★ 1978 : Penzias & Wilson
  - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE



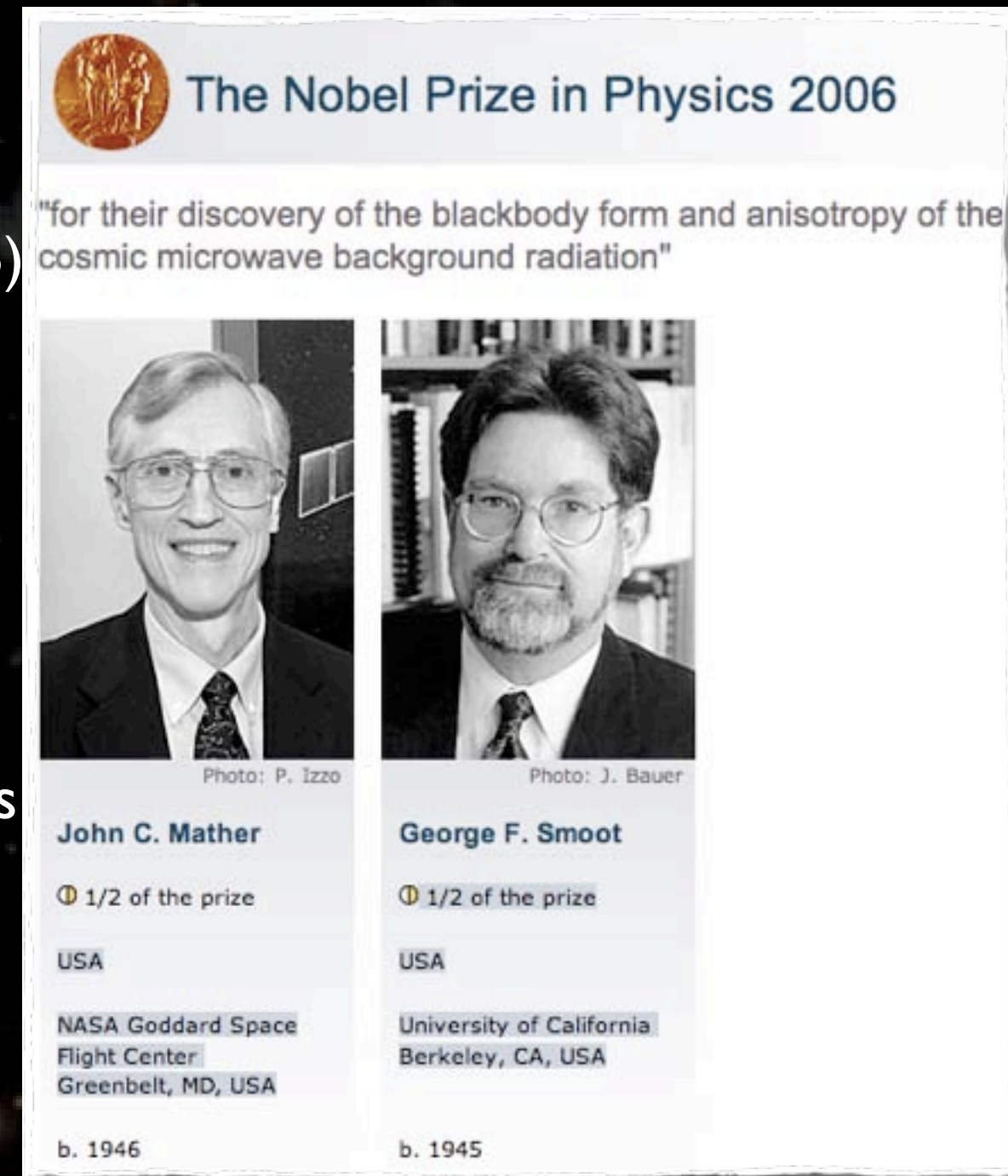
(COBE/DMR homepage)





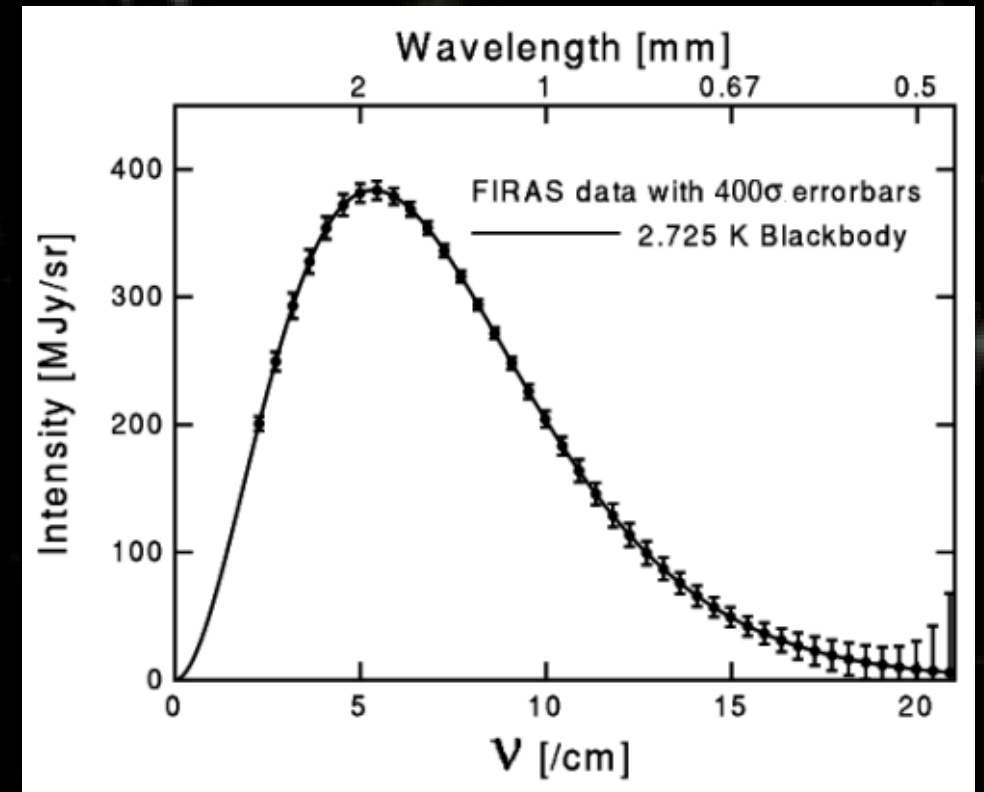
# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
  - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
  - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
  - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
  - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
  - ★ 400 photons/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
  - ★ 1978 : Penzias & Wilson
  - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

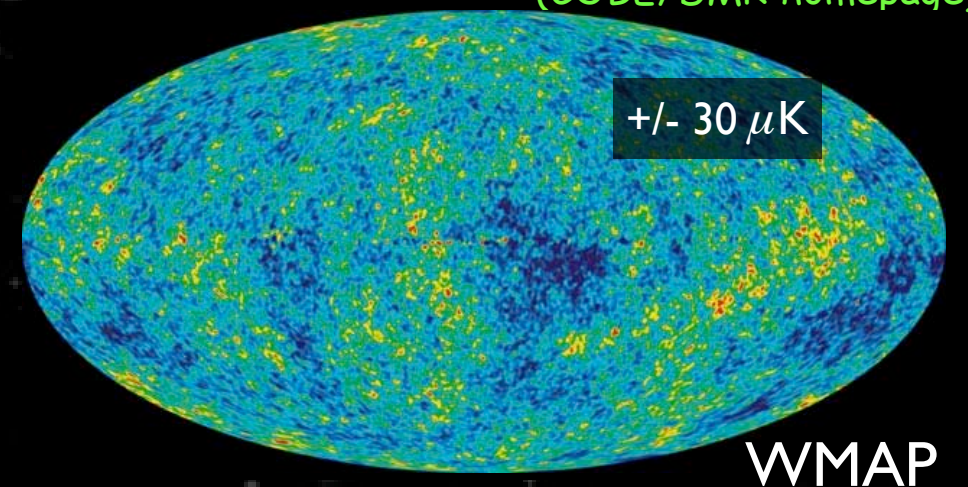


# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
  - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
  - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
  - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
  - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
  - ★  $400 \text{ photons/cm}^3$
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
  - ★ 1978 : Penzias & Wilson
  - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE



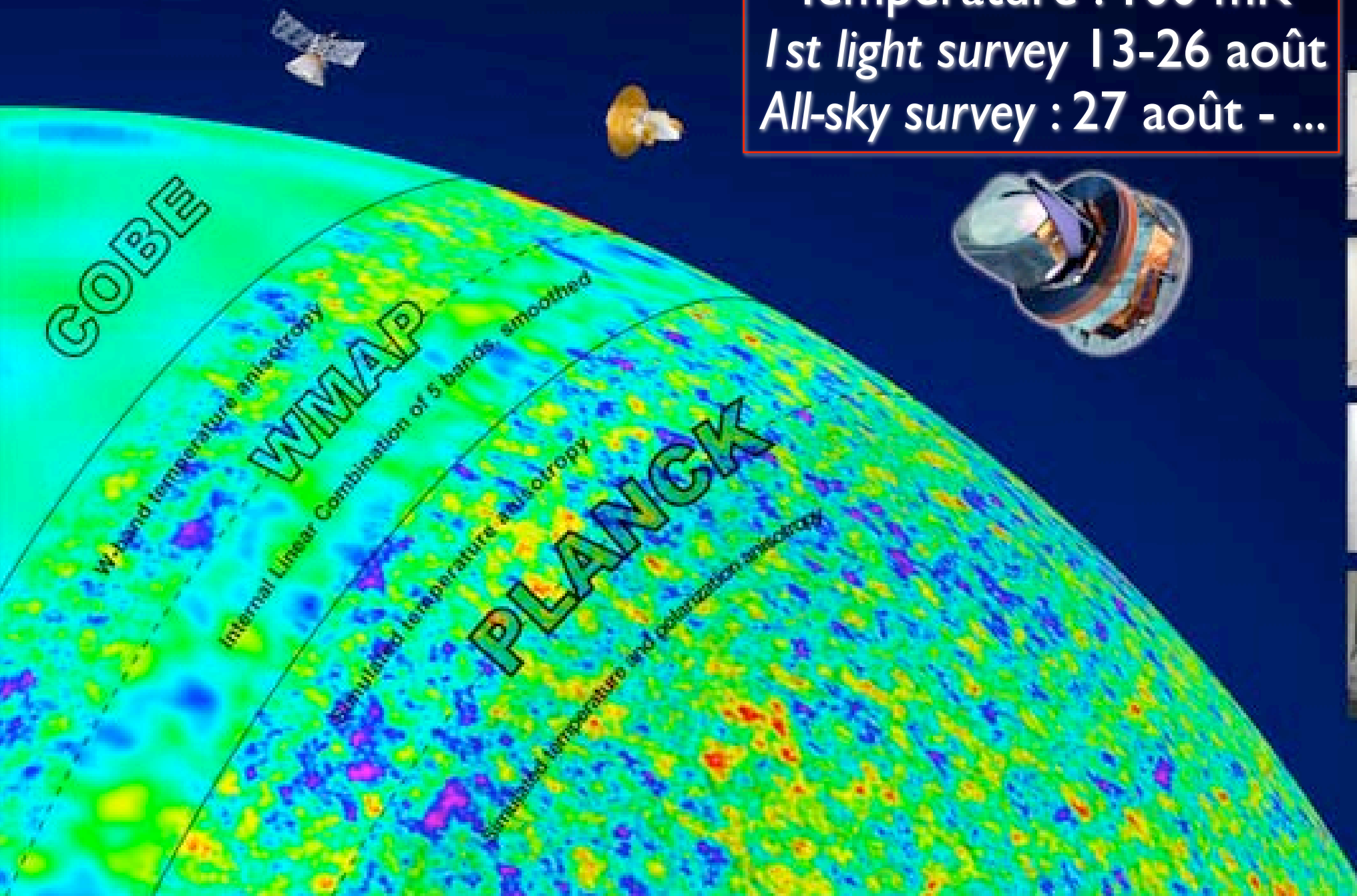
(COBE/DMR homepage)





PLANCK  
SIMULATION

Lancé le 14 mai 2009  
Température : 100 mK  
1st light survey 13-26 août  
All-sky survey : 27 août - ...





Structure of the Universe as found  
by the Sloan Digital Sky Survey  
and the NASA/WMAP Science Team

Galaxies LRG:  
 $z \sim 0.5 \Leftrightarrow D_p = 1.9 \text{ Gpc/h}$

Quasars distants:  
 $z \sim 5 \Leftrightarrow D_p = 7.8 \text{ Gpc/h}$

Émission du CMB:  
 $z \sim 1000 \Leftrightarrow D_p = 13.6 \text{ Gpc/h}$

# Relier les anisotropies du CMB aux fluctuations primordiales

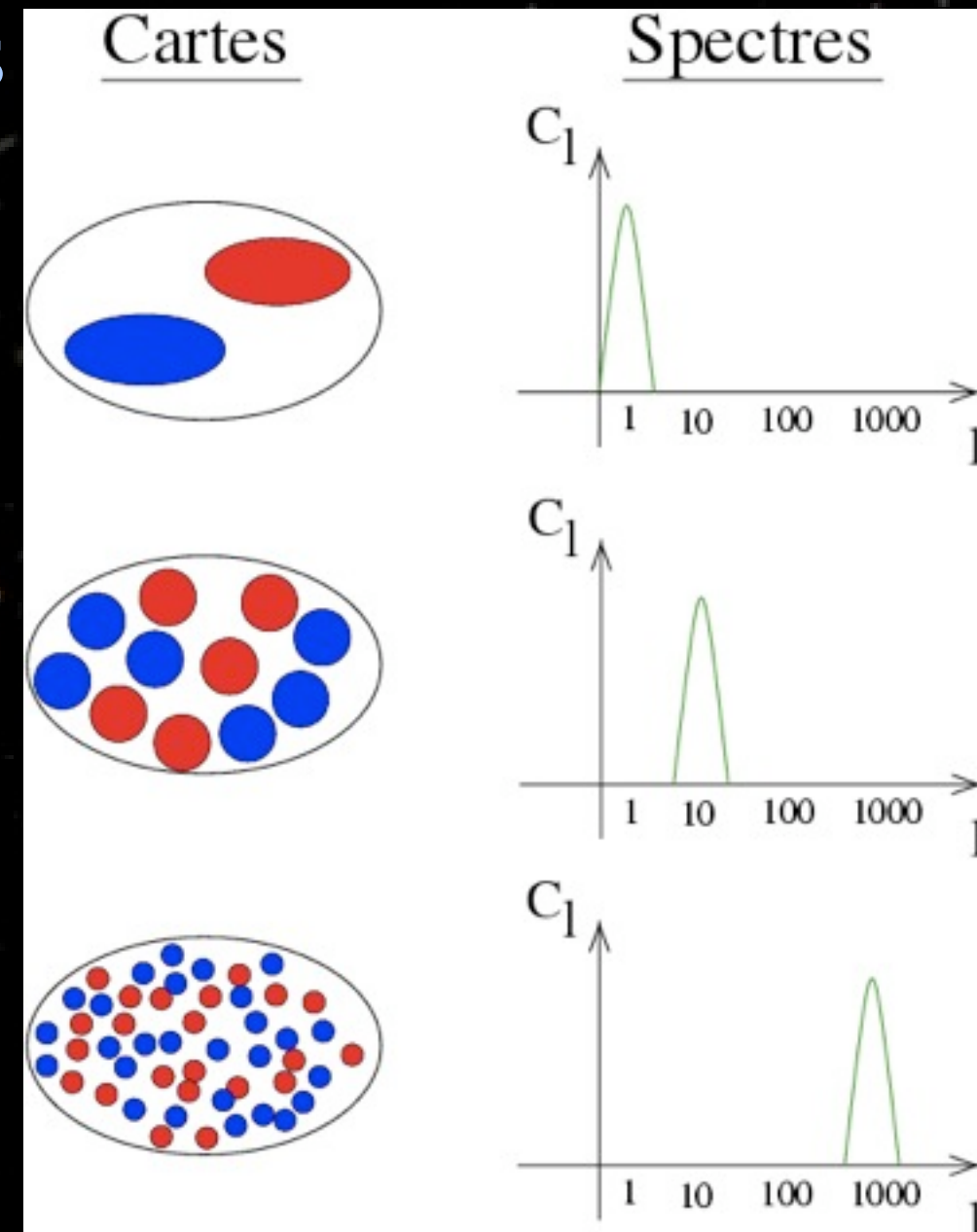
- Développement en harmoniques sphériques

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi)$$

- Spectre de puissance angulaire

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$$

- $\ell$  est l'inverse d'un angle  
 $\ell = 200 \leftrightarrow \theta = 1\text{deg.}$



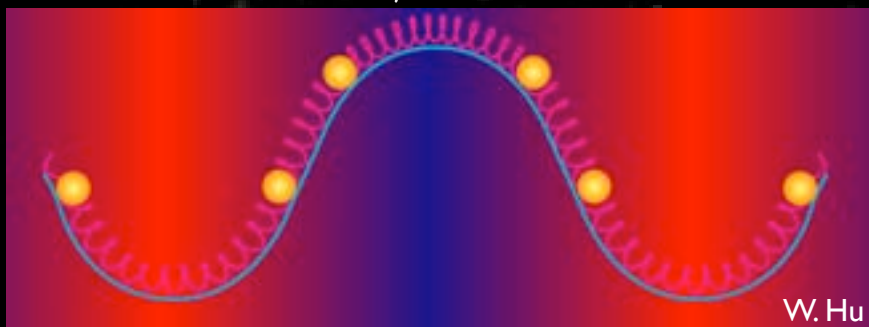
B. Revenu



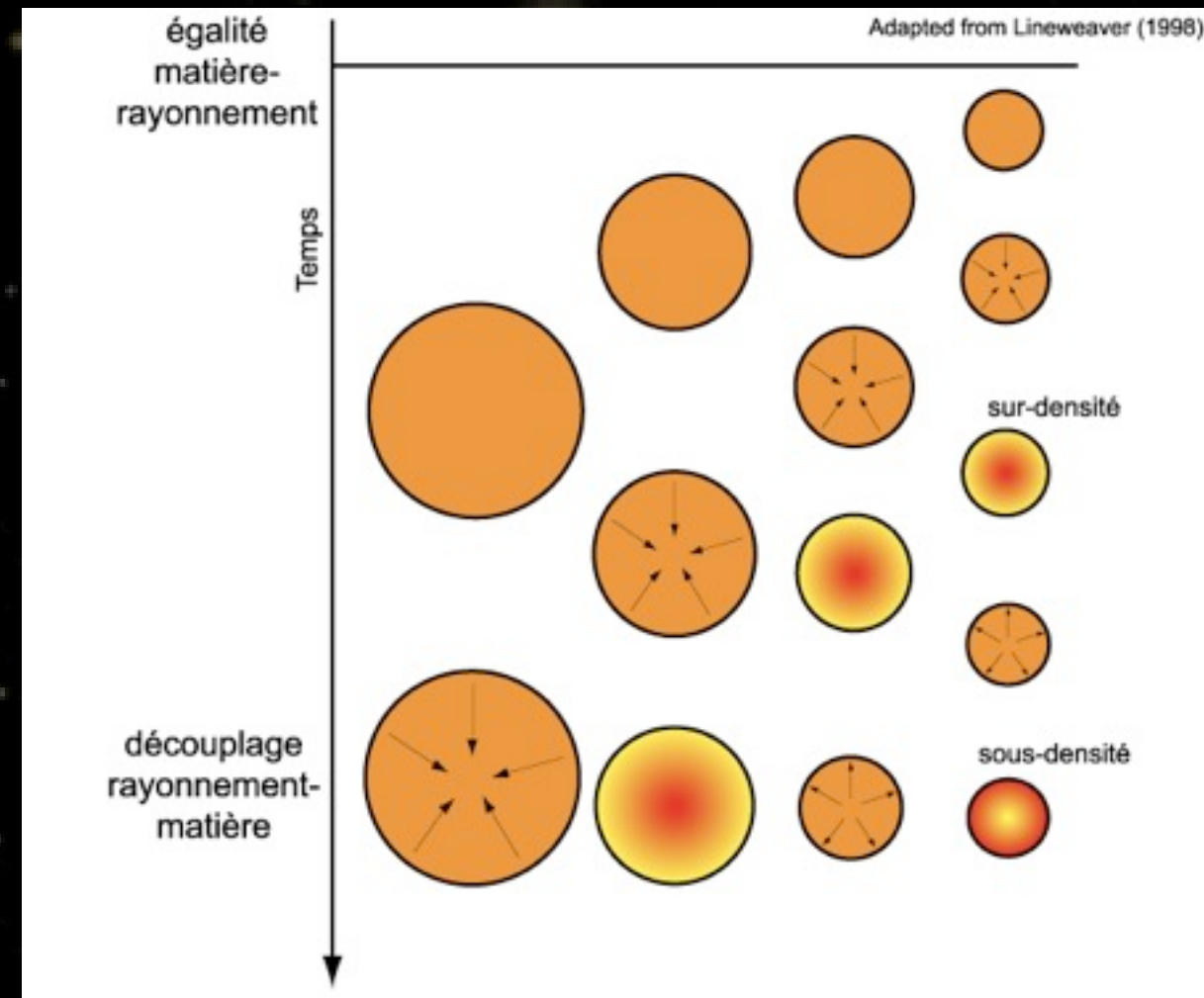


# Forme du spectre de puissance

- ★ L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement  
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement
- ★ Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ( $c/\sqrt{3}$ )



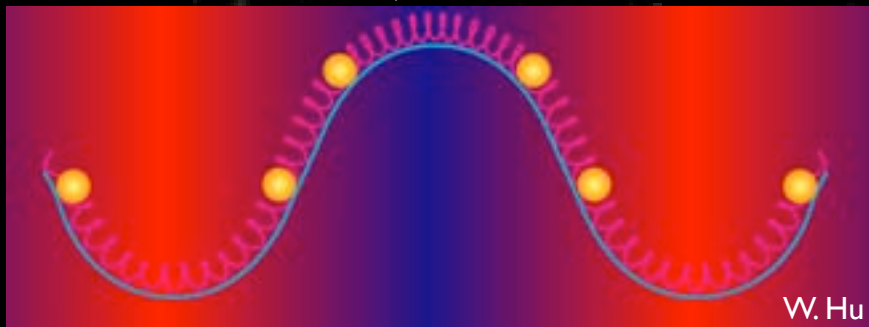
- ★ les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement



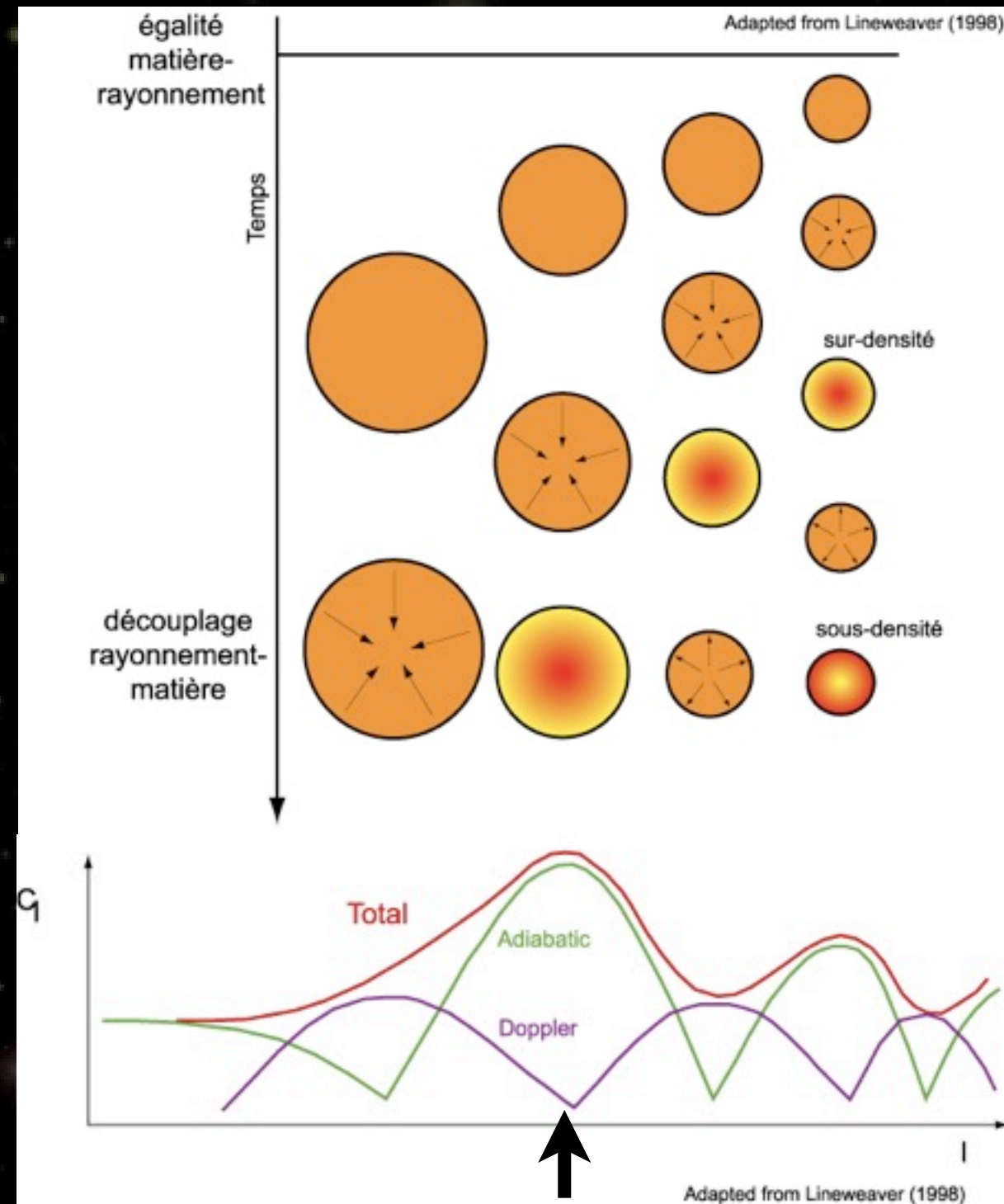


# Forme du spectre de puissance

- ★ L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement  
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement
- ★ Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ( $c/\sqrt{3}$ )



- ★ les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement



150 Mpc à  $z=1000$



# Influence de la géométrie de l'Univers

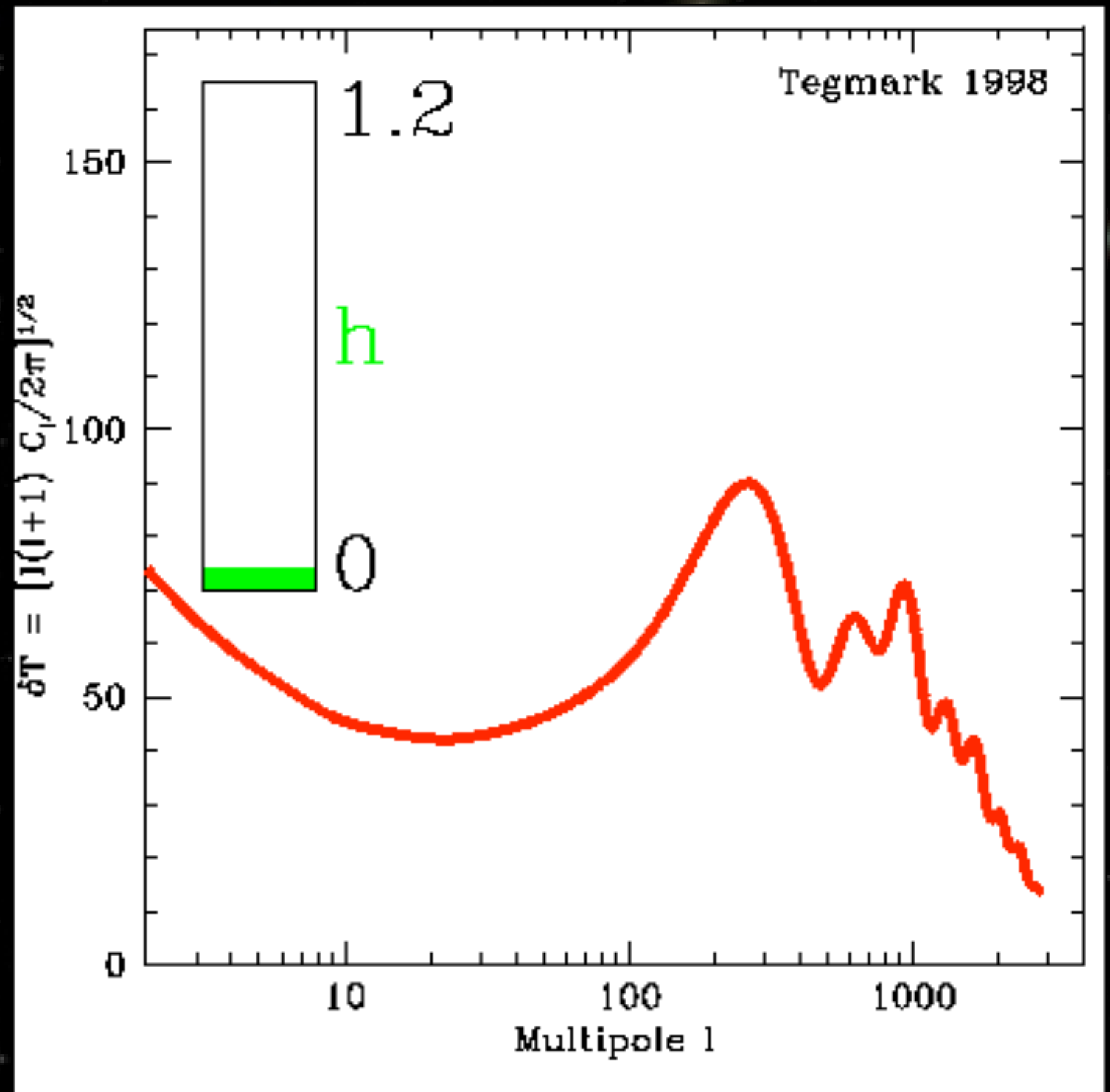
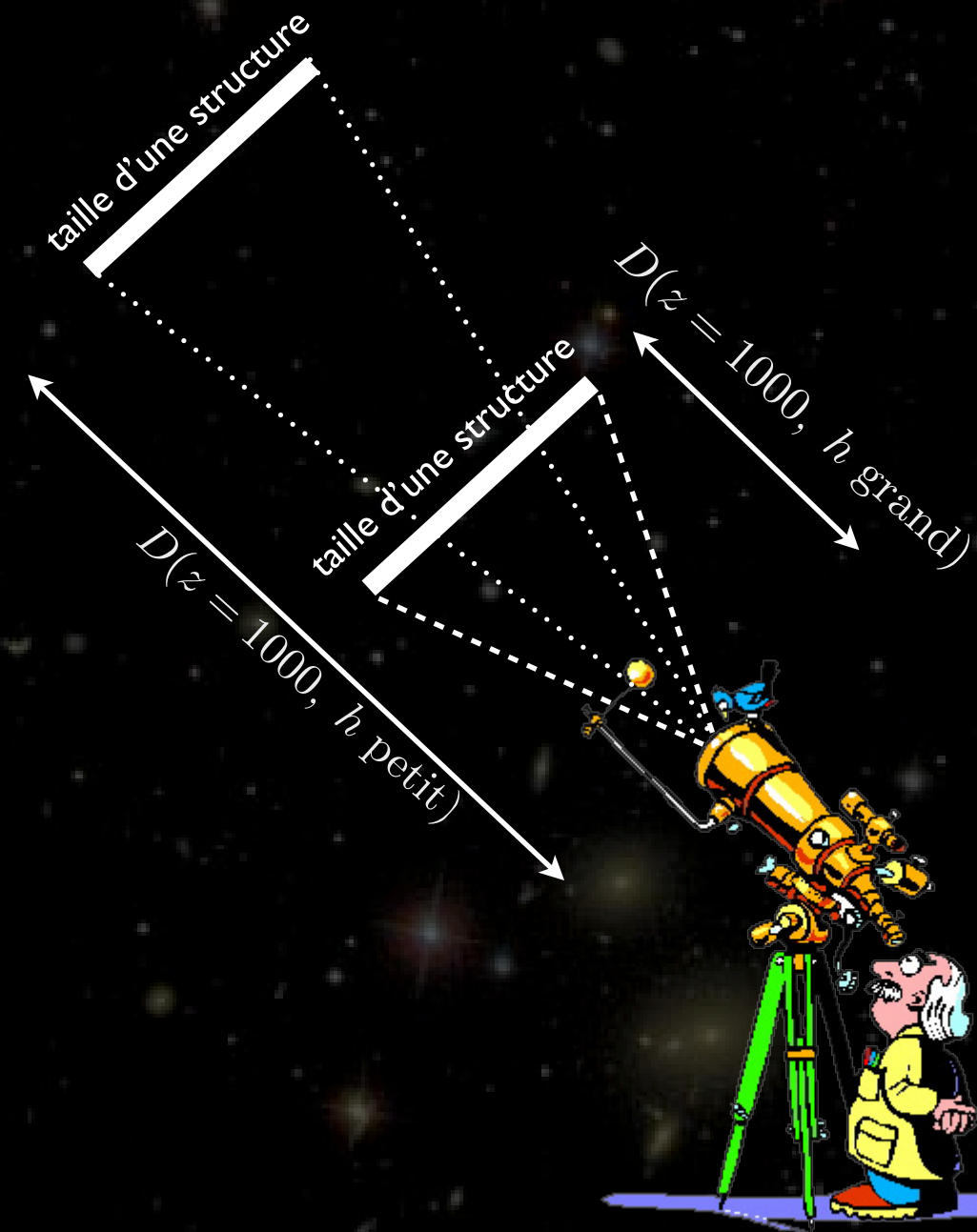


WMAP



# Constante de Hubble

$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$

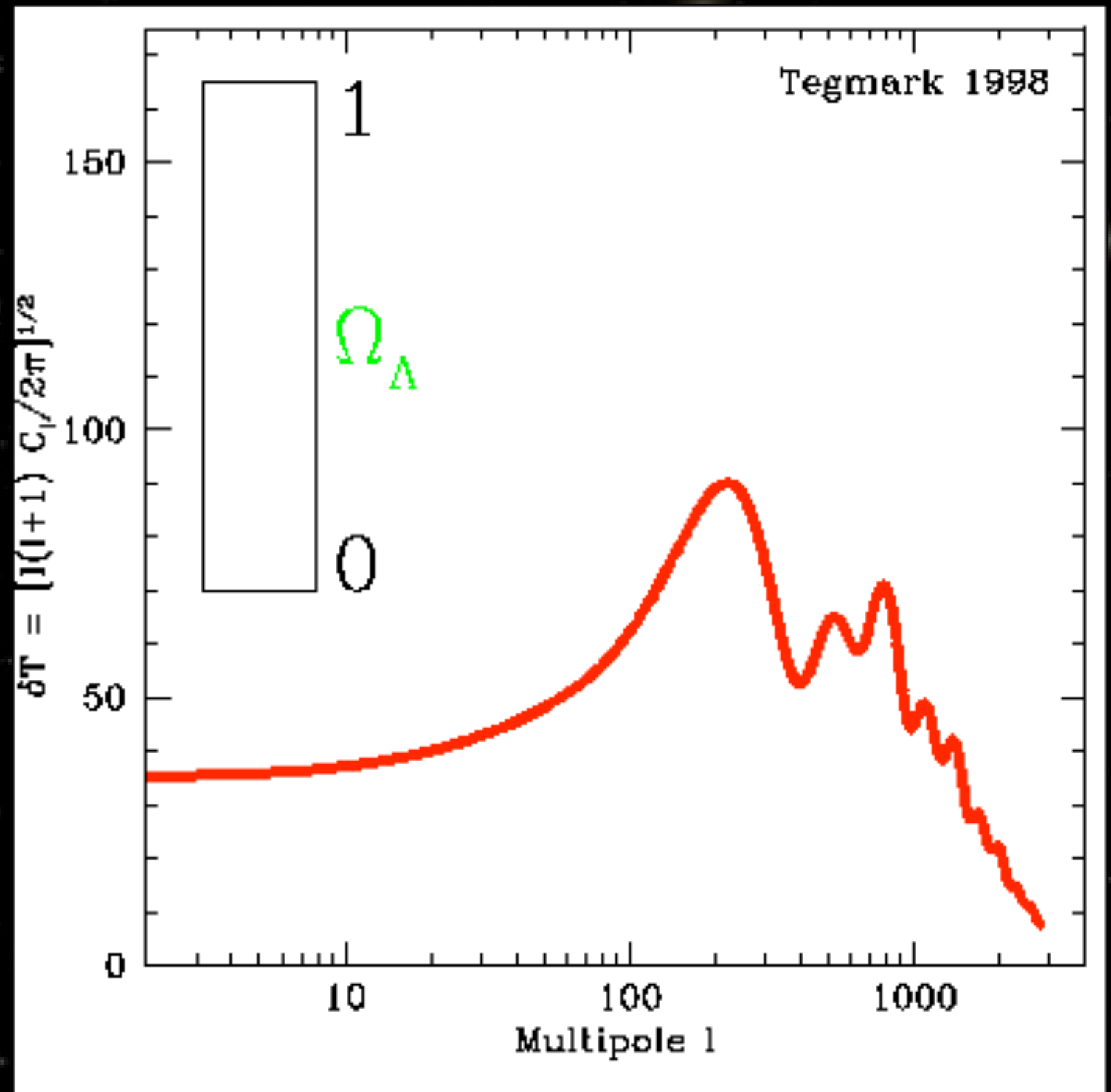
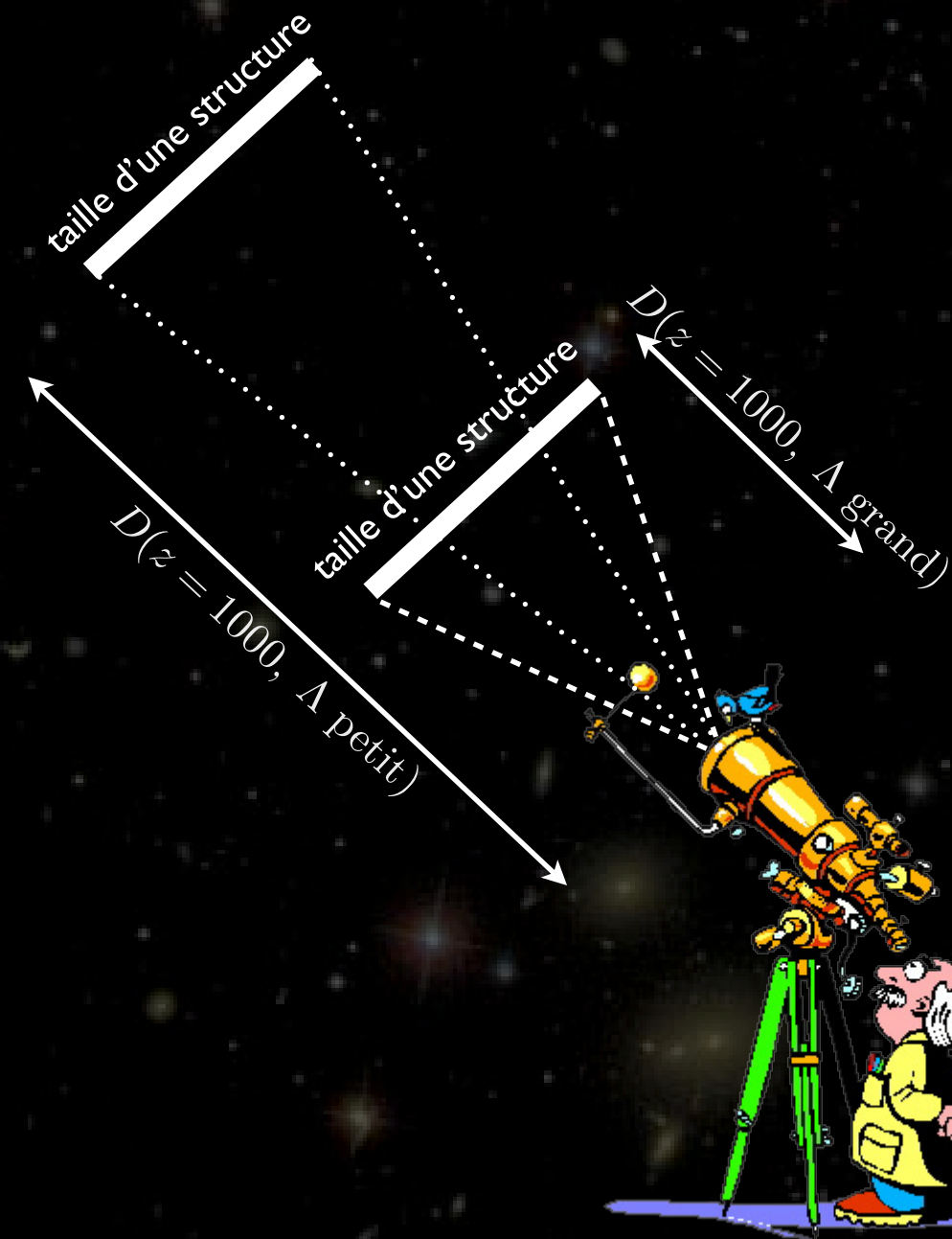




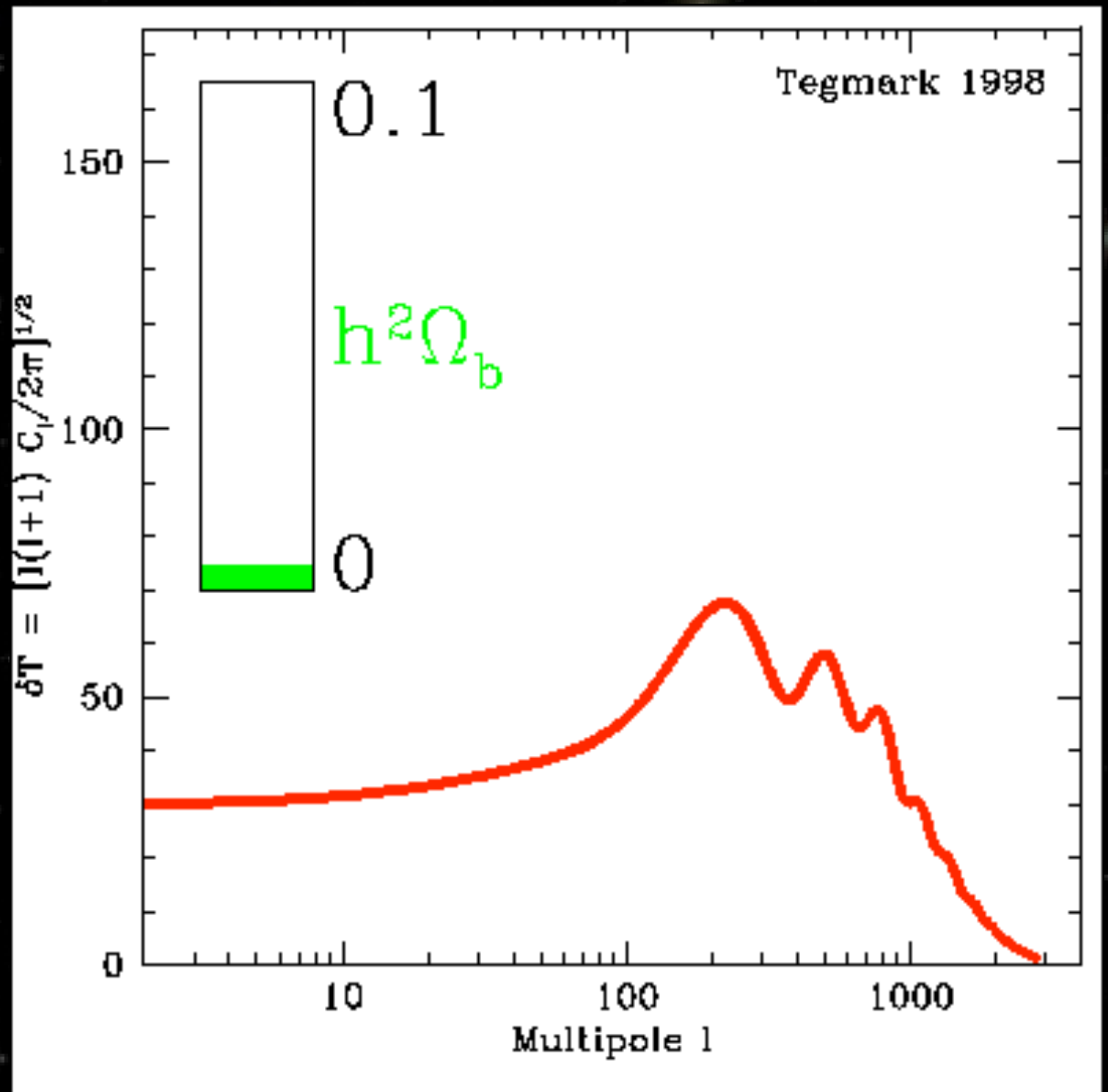
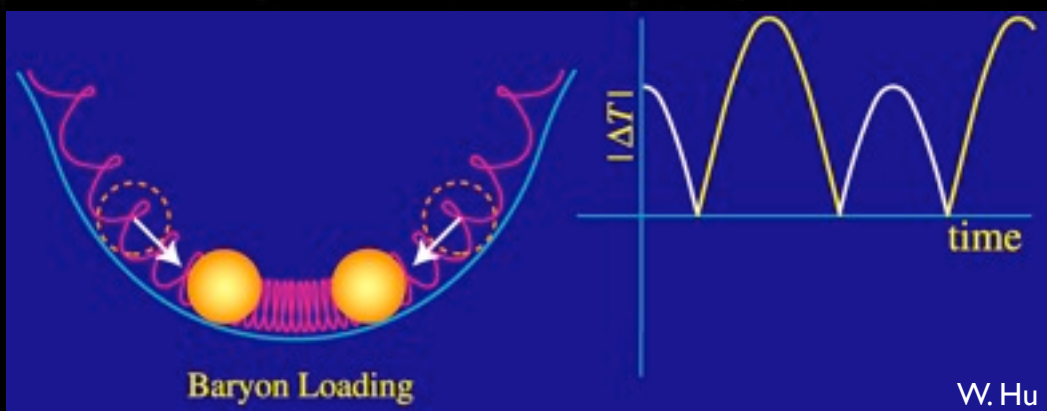
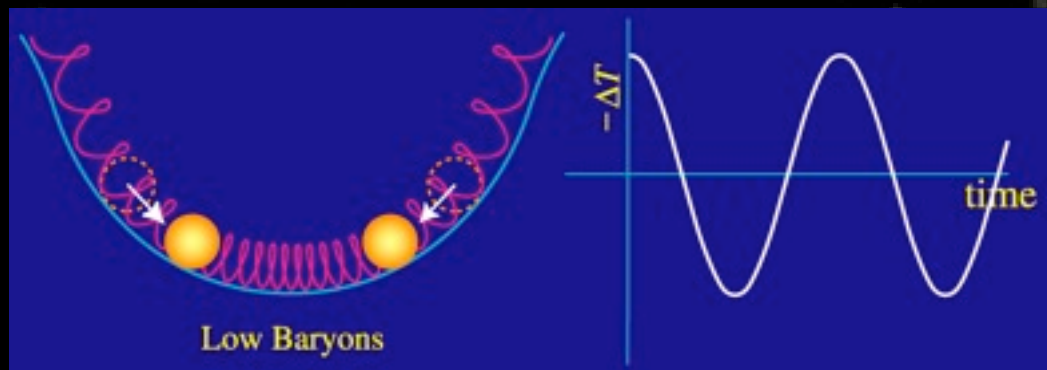
# Énergie sombre

$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$

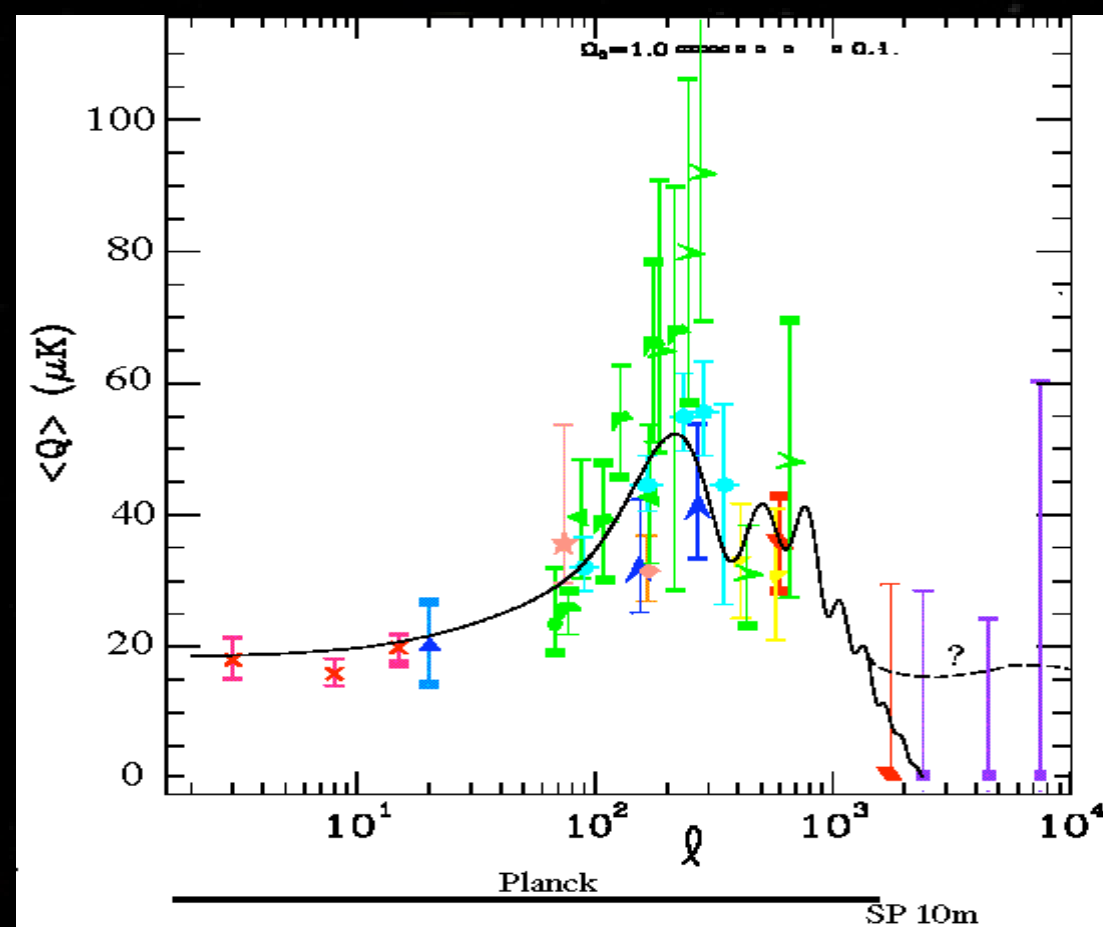
$\Lambda$  accélère l'expansion



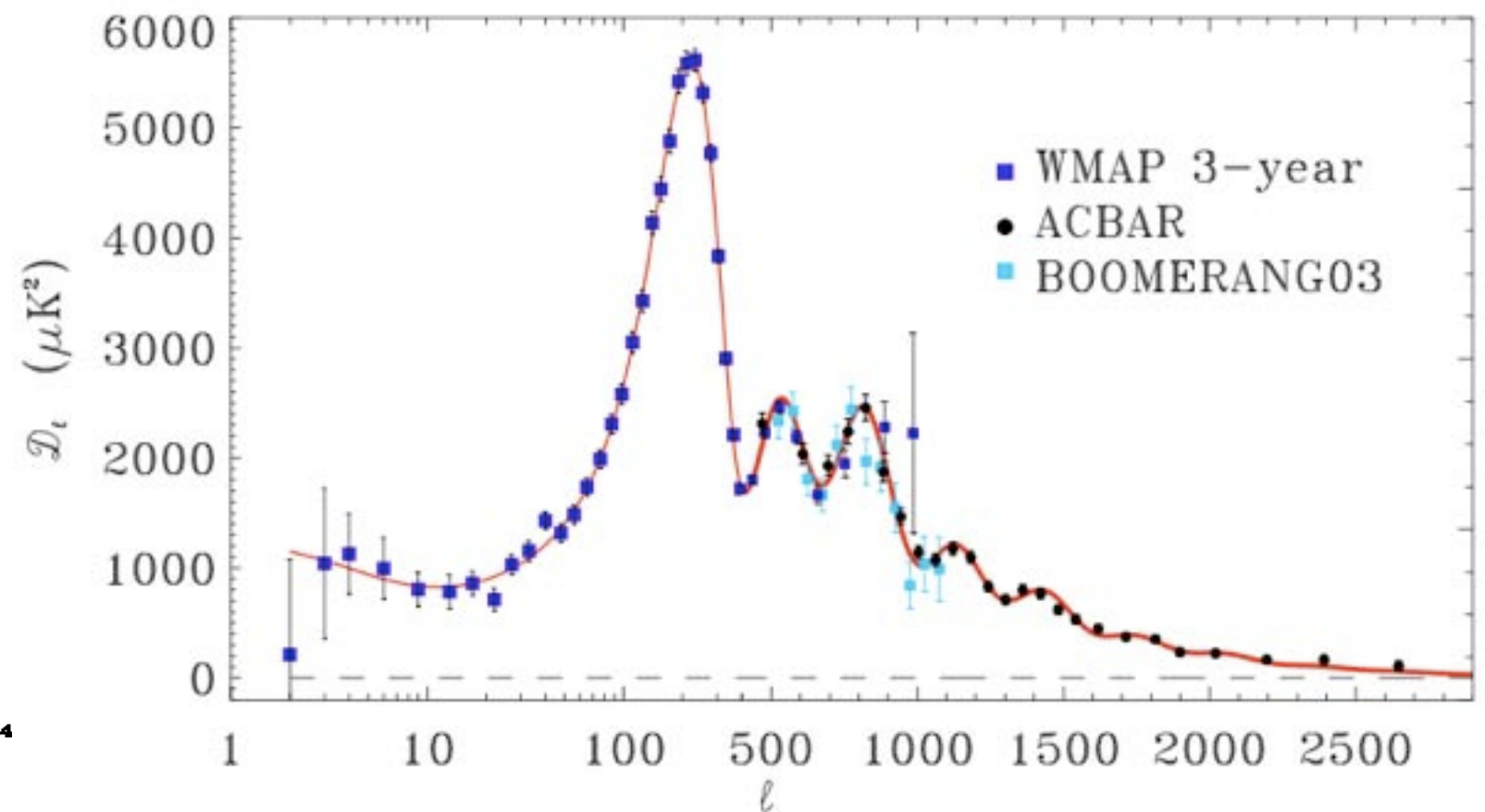
# Matière baryonique



# un domaine bouillonnant...



1999



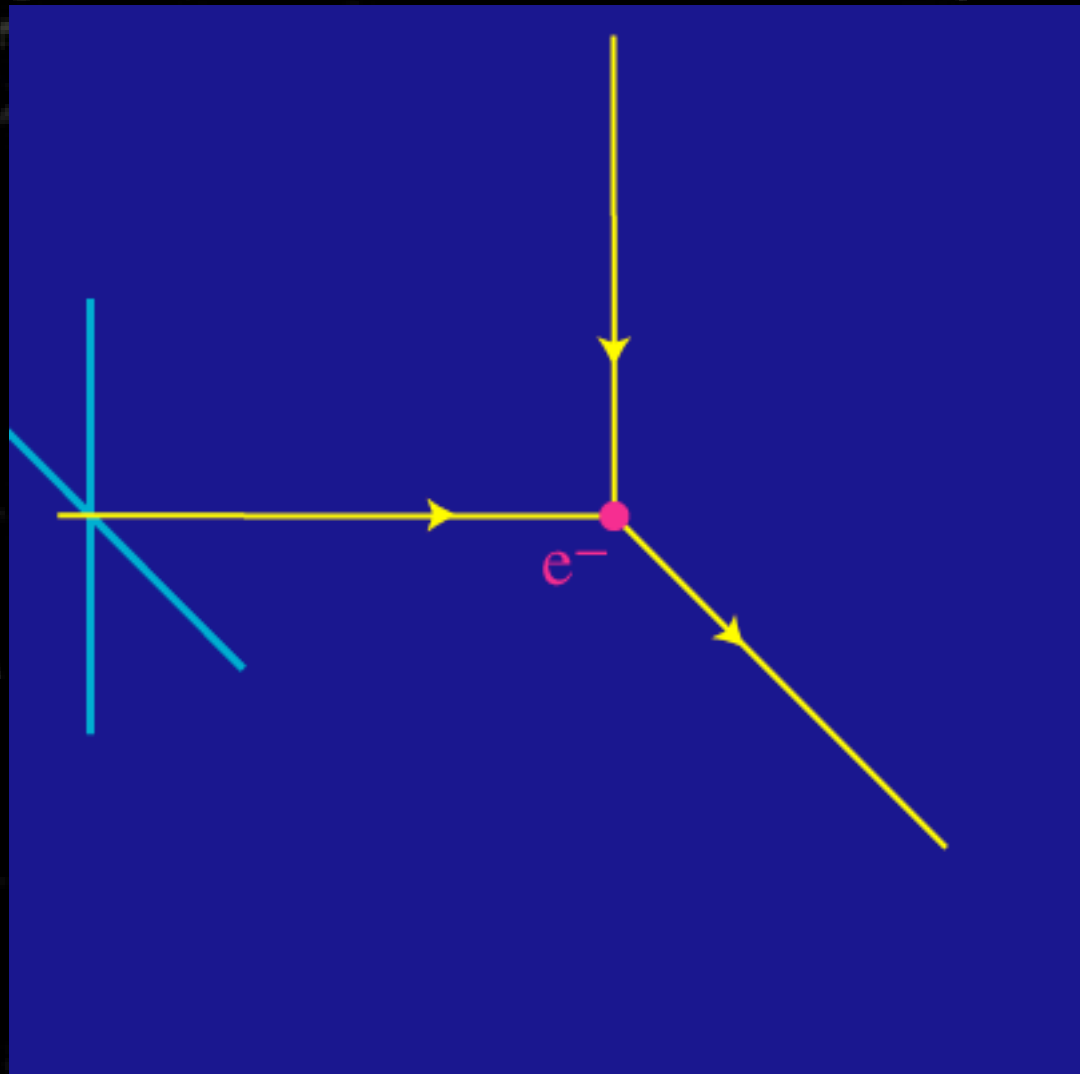
2009

Grâce à WMAP, mais surtout à l'apparition des bolomètres  
et à l'augmentation de leur nombre

Bientôt Planck ...



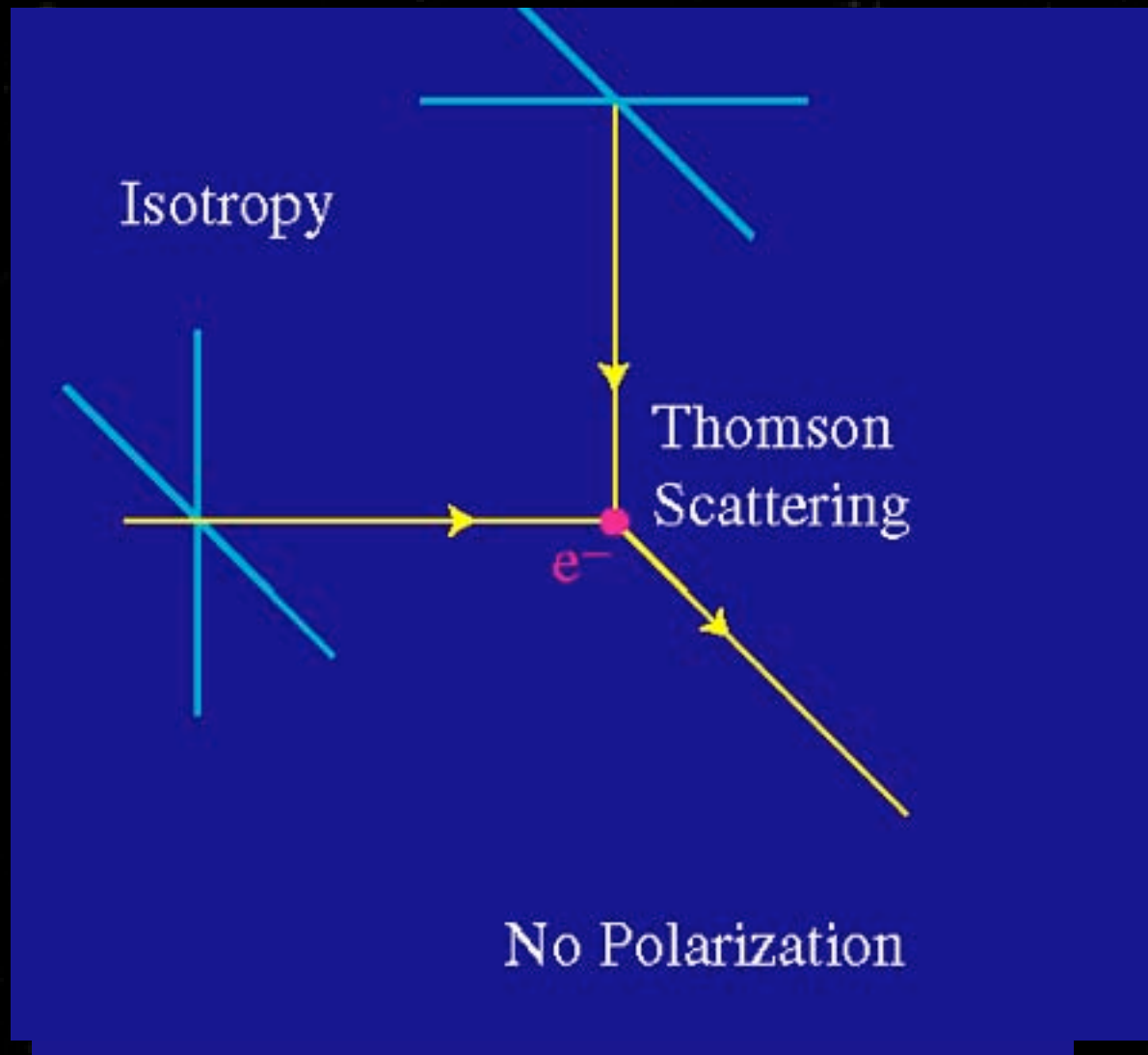
# Le CMB est polarisé (10%) !



W. Hu

N. Ponthieu

# Le CMB est polarisé (10%) !

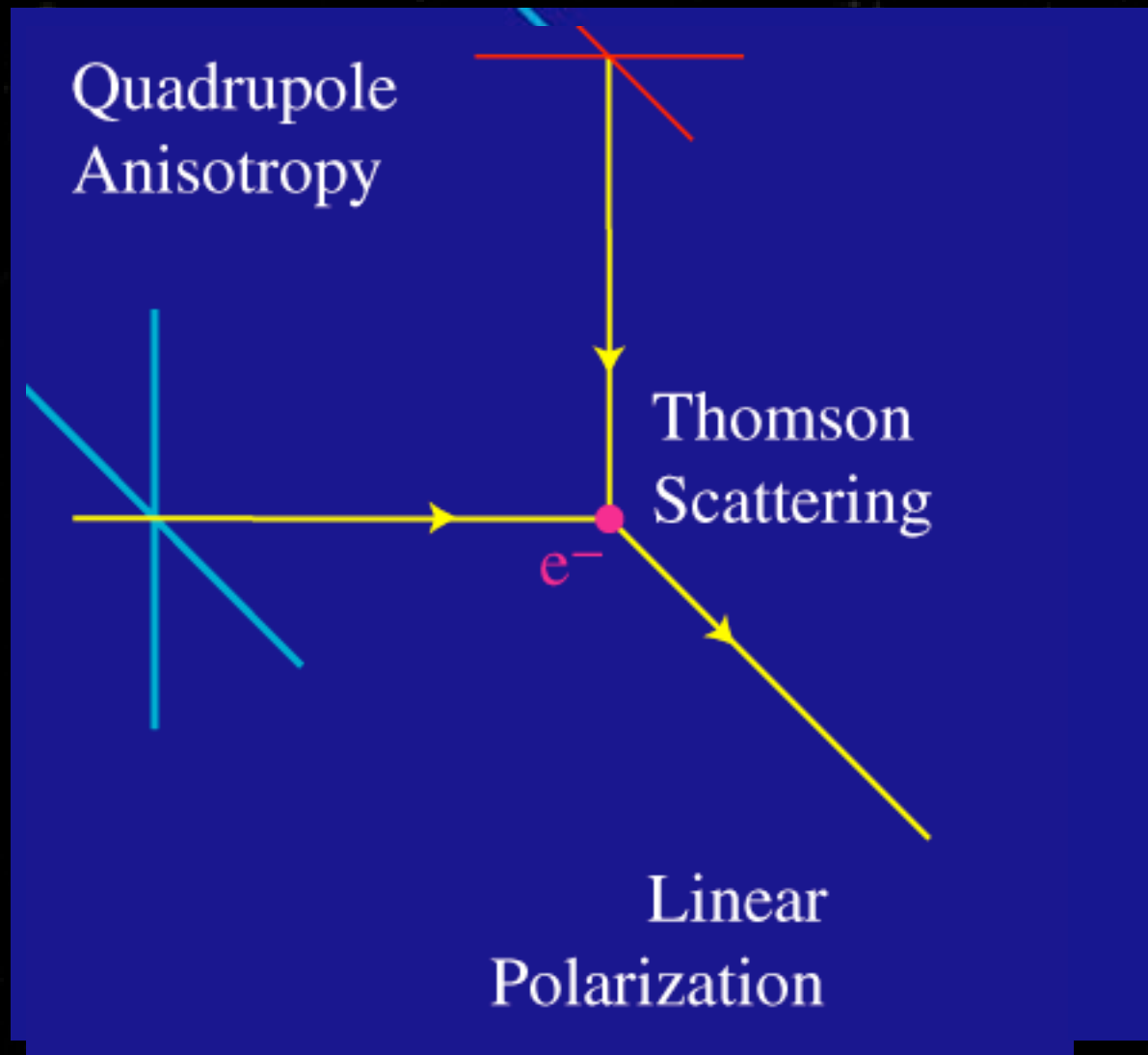


W. Hu

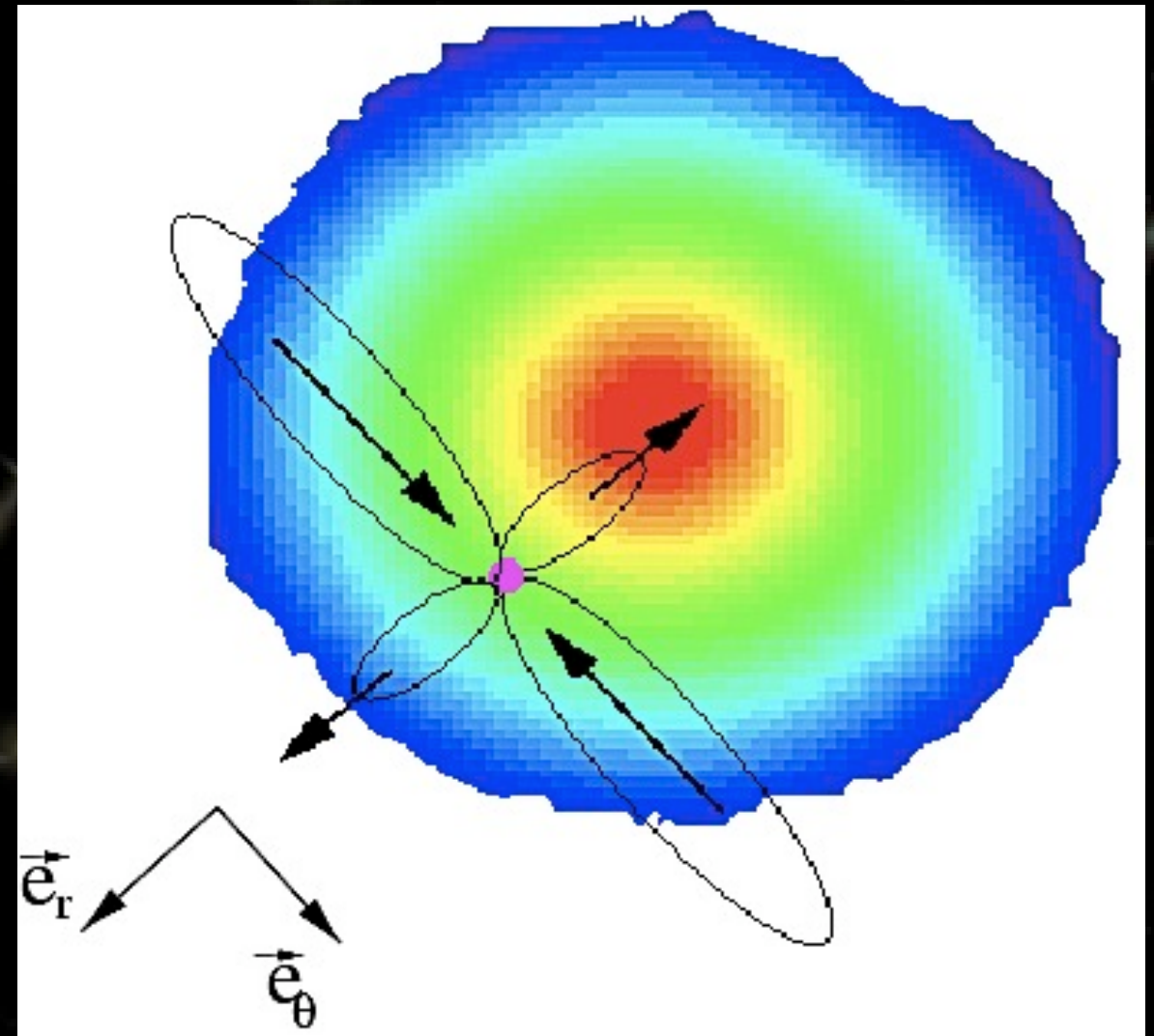
N. Ponthieu



# Le CMB est polarisé (10%) !



W. Hu

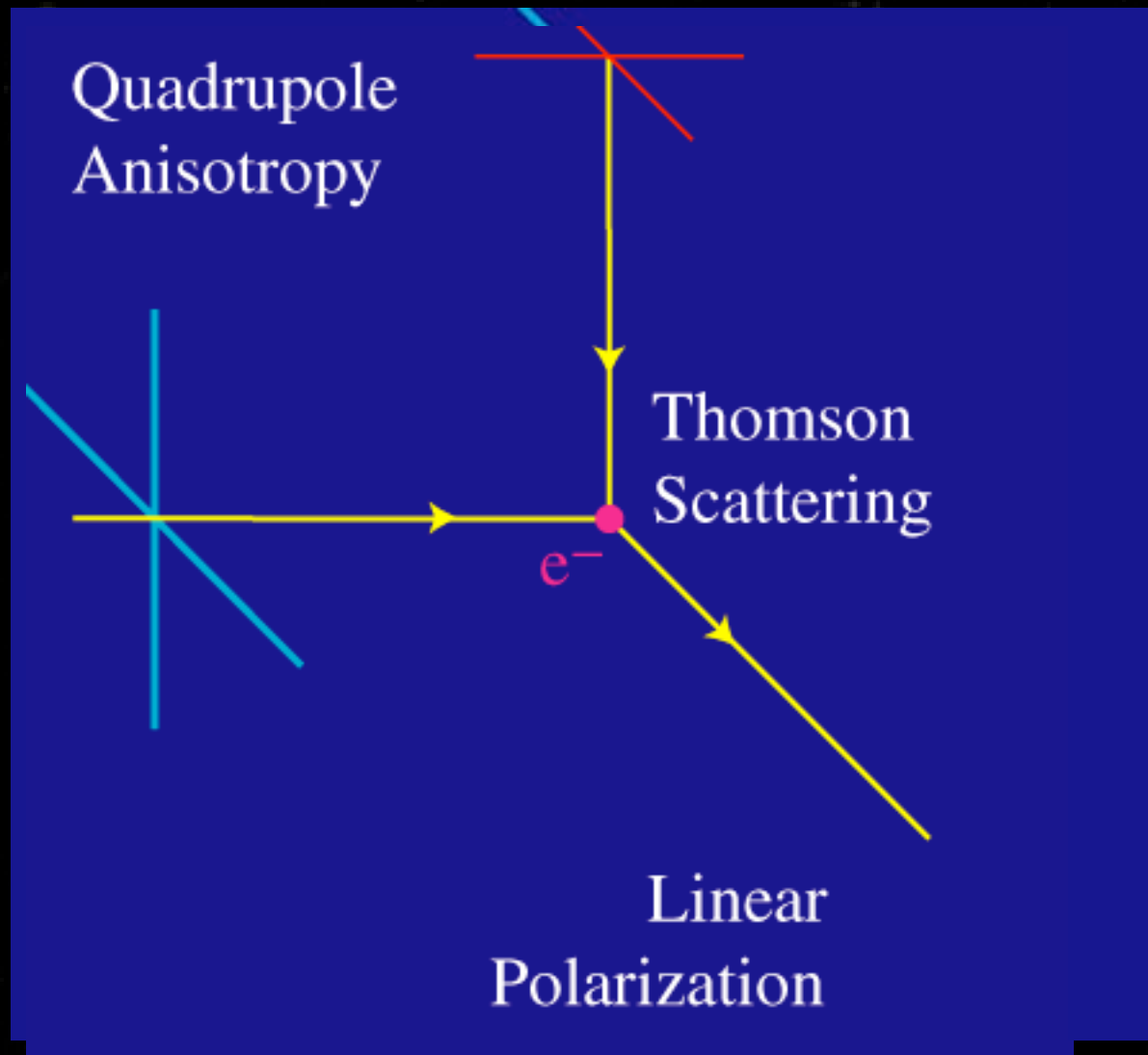


N. Ponthieu

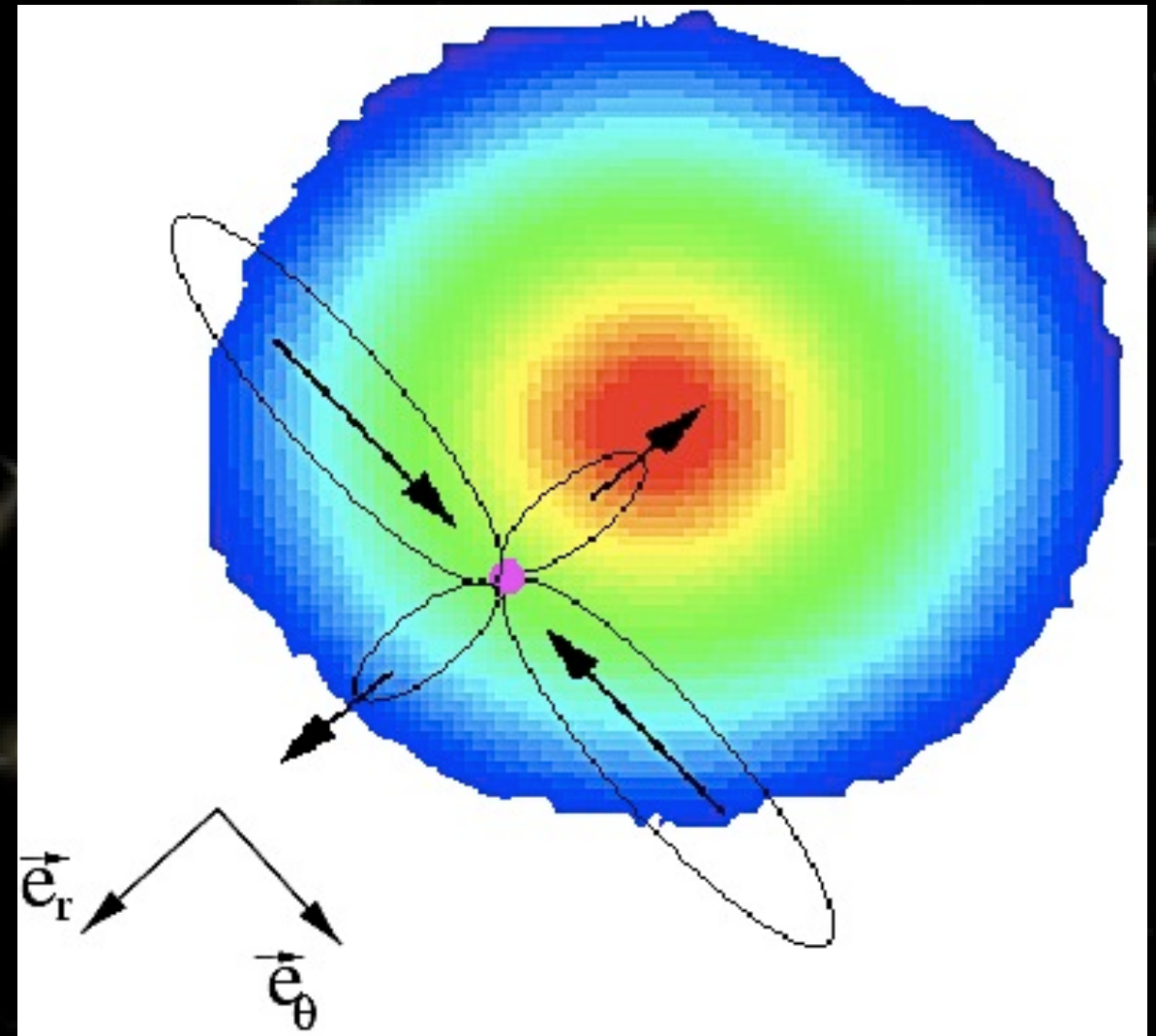




# Le CMB est polarisé (10%) !



W. Hu



N. Ponthieu

## Précieuses informations complémentaires !!!

$$C_\ell^{TT}, C_\ell^{TE}, C_\ell^{EE}, C_\ell^{BB}$$



# Caractérisation de la polarisation

## ★ Paramètres de Stokes :

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

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

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

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



G.G. Stokes

## ★ Décomposition en harmoniques sphériques de spin +/- 2

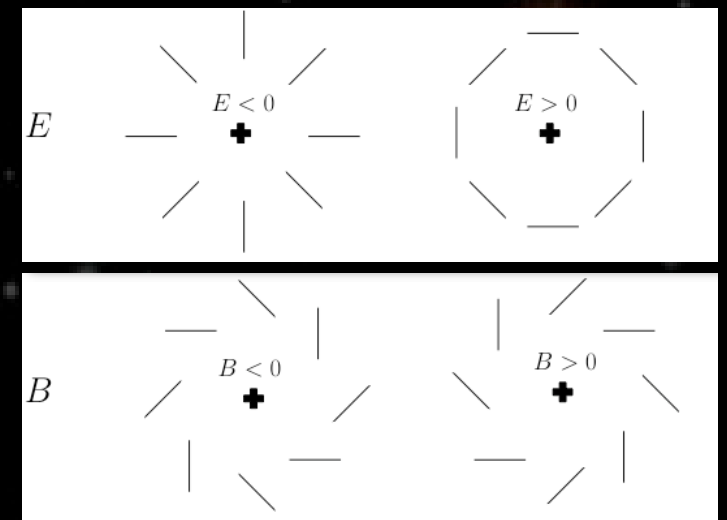
$$Q(\vec{n}) + iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{2,\ell m} {}_2Y_{\ell m}(\vec{n})$$

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

## ★ Tout champ de polarisation peut être décomposé en 2 champs scalaires $E$ et $B$

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

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



# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires





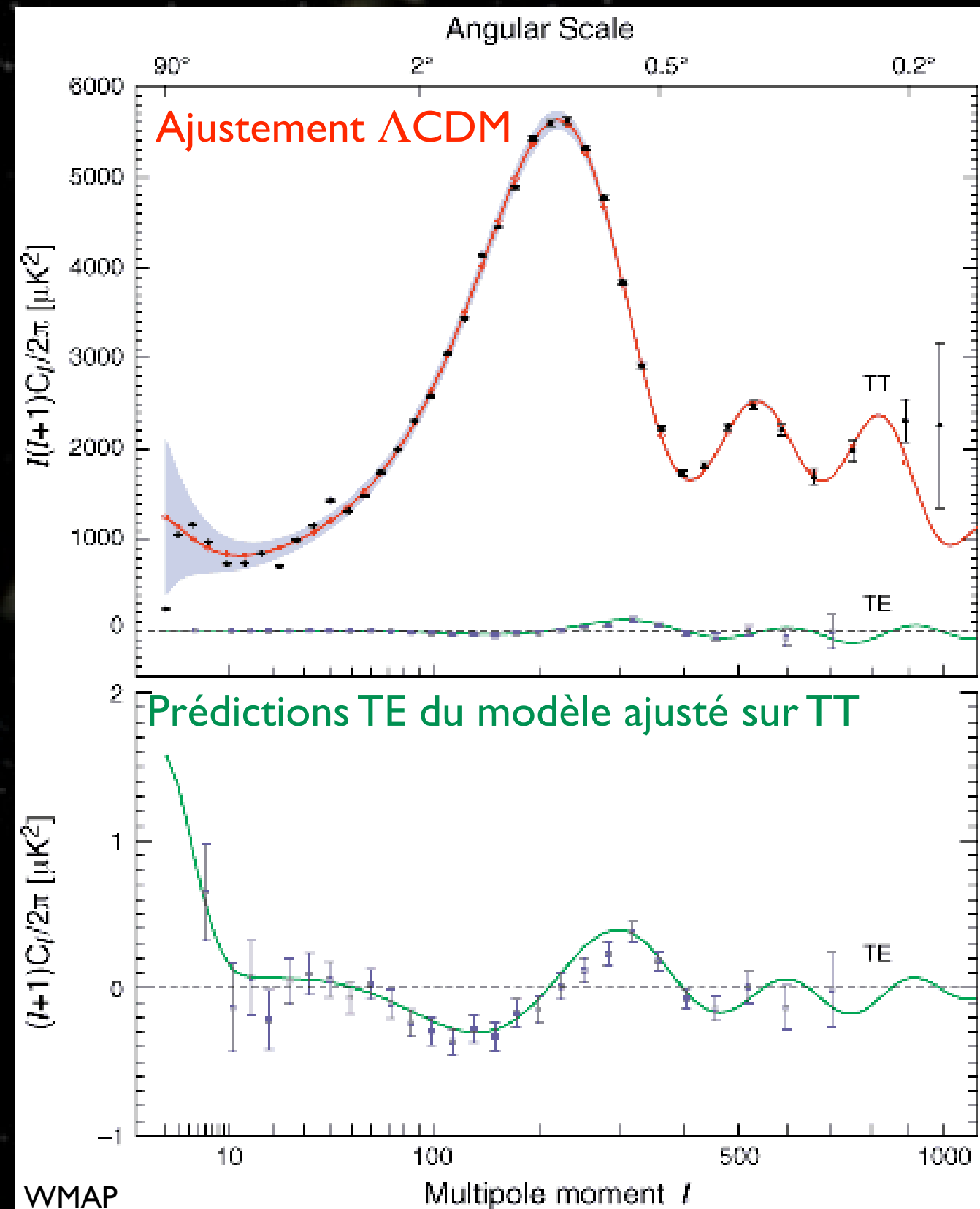
# Spectres et mesures

- **Température :**

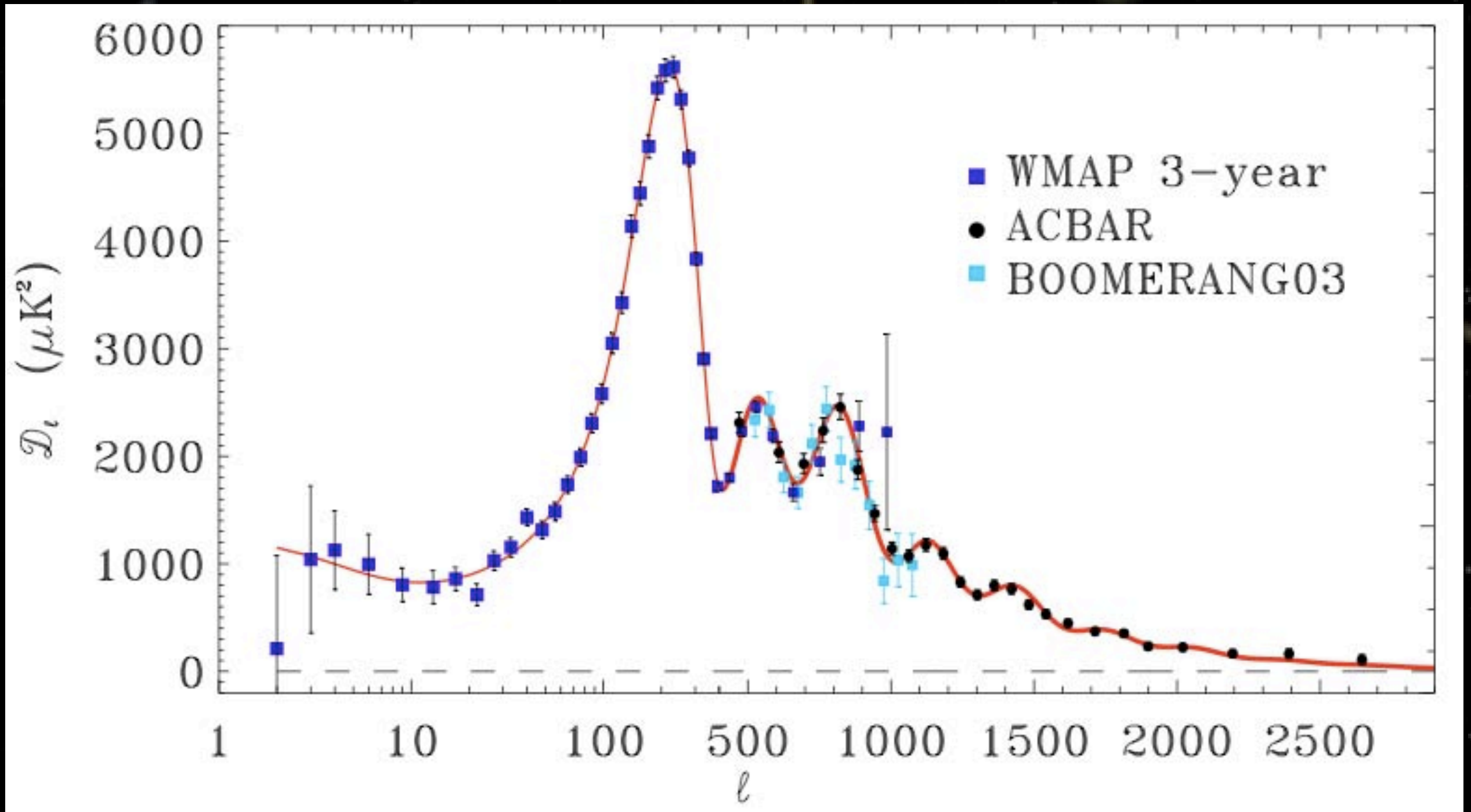
- ★ Mesure de précision
- ★ parfait accord avec l'inflation
- ★ paramètres cosmologiques à quelques %

- **Polarisation :**

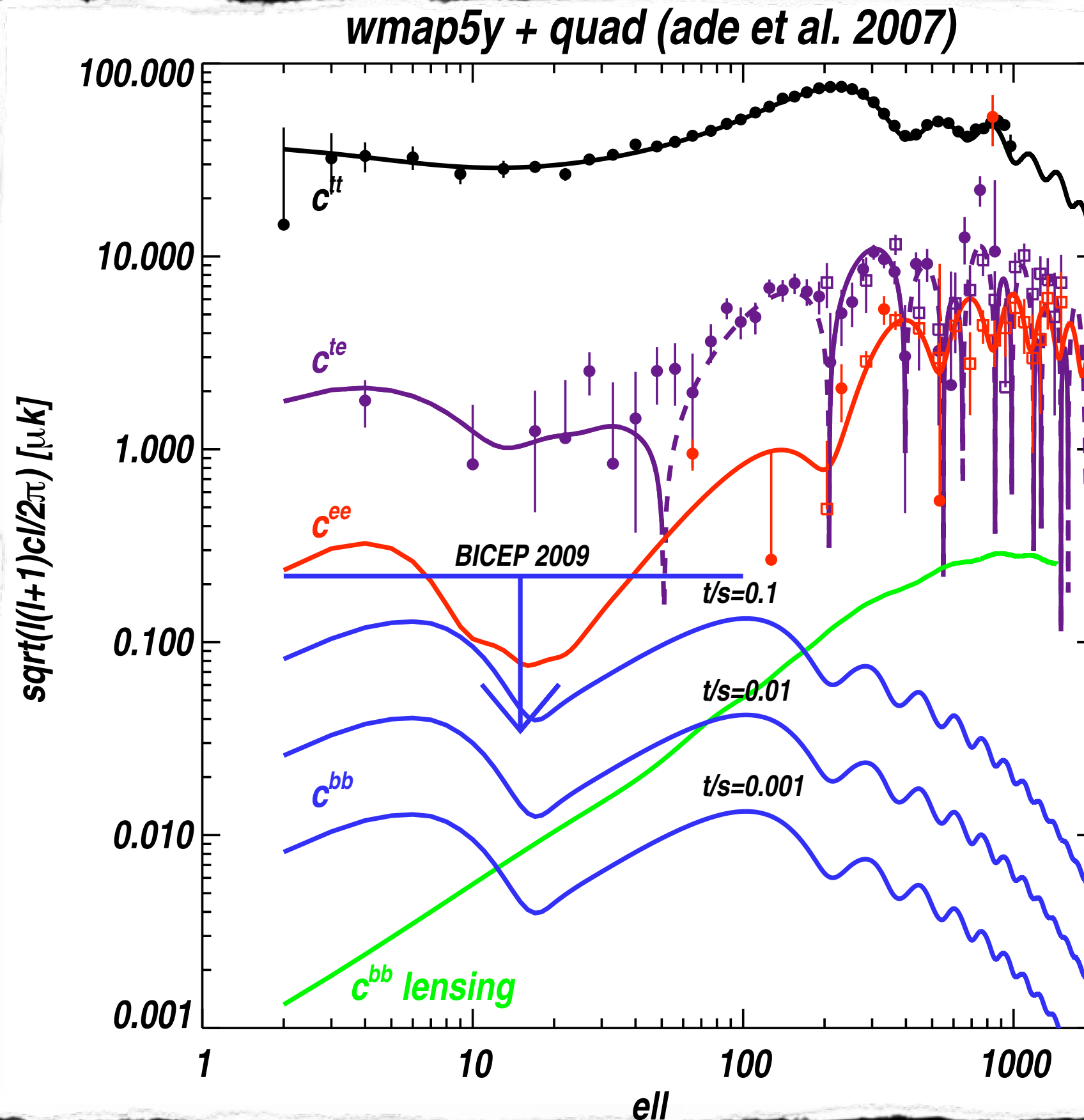
- ★ Détection de TE et EE
- ★ précision modérée
- ★ limite supérieure sur BB



# Best Of CMB



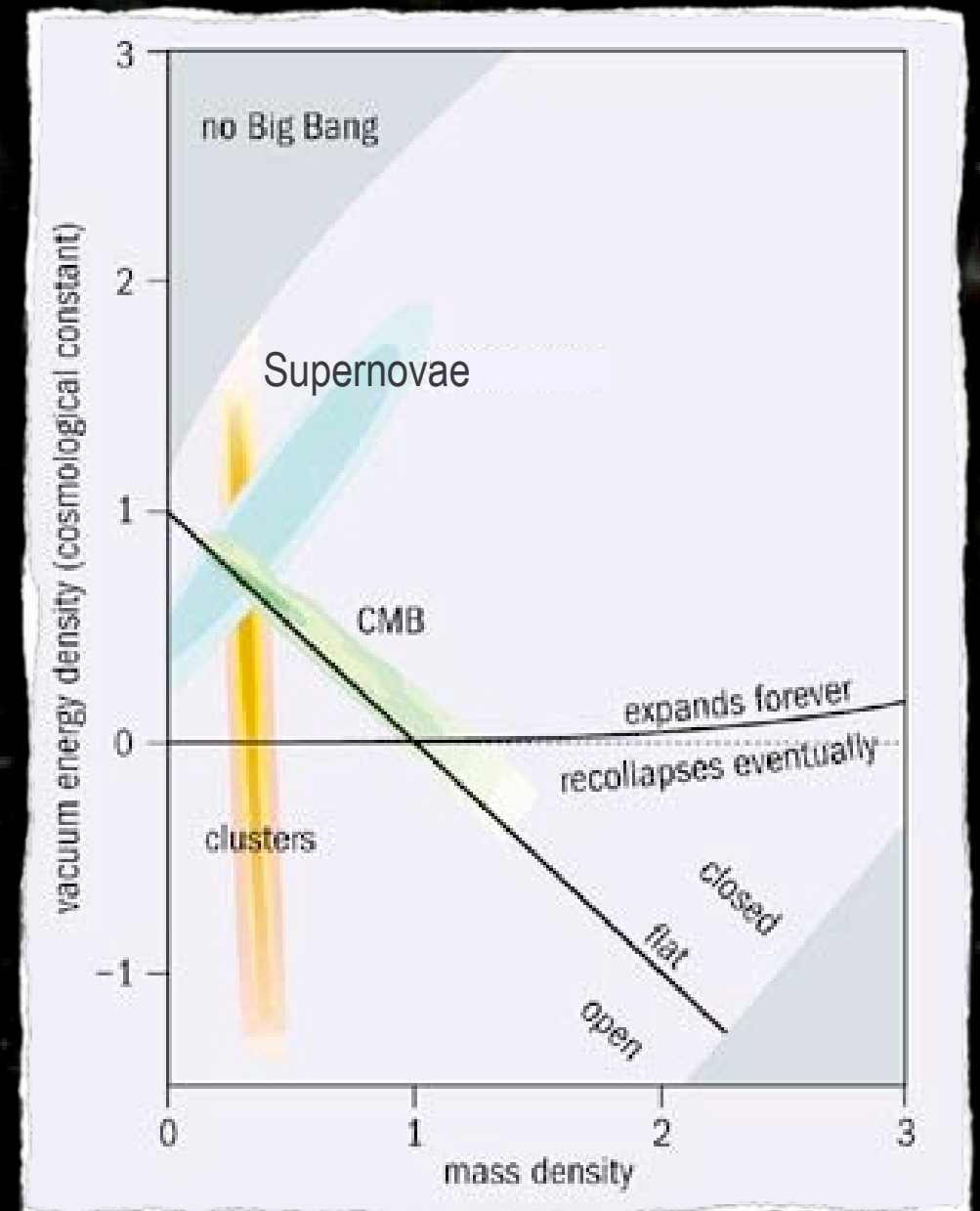
# Avec la polarisation





# ce que l'on sait déjà

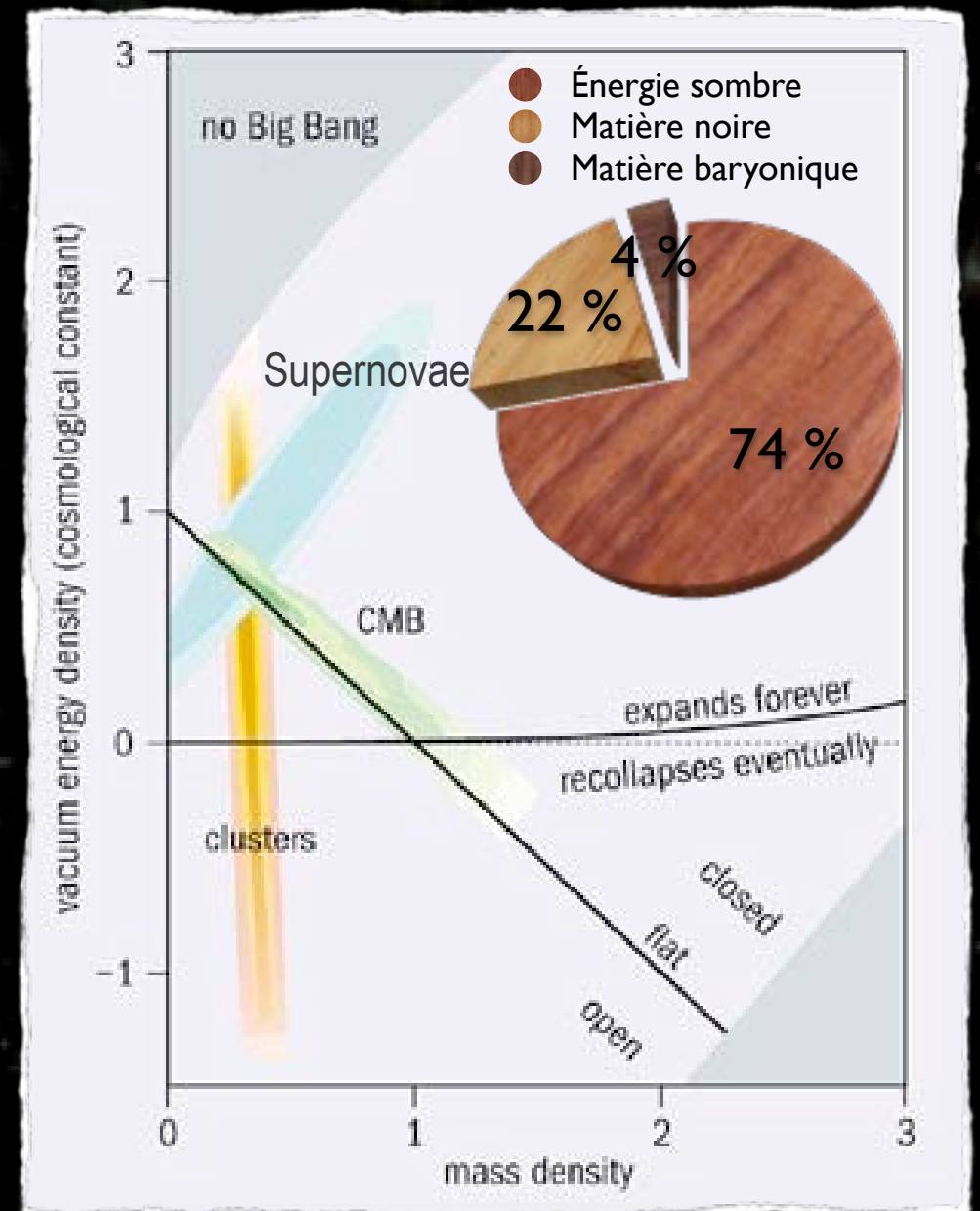
- Modèle standard de la cosmologie :  $\Lambda$ CDM
  - ★ L'Univers est en expansion
    - Constante de Hubble
  - ★ L'Univers est plat :  $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
  - ★ Il contient de la matière noire
    - quantité connue, nature inconnue
  - ★ Il contient de l'énergie sombre
    - quantité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



Crédits : CMB (T et E), SNIa et catalogues de galaxies et d'amas

# ce que l'on sait déjà

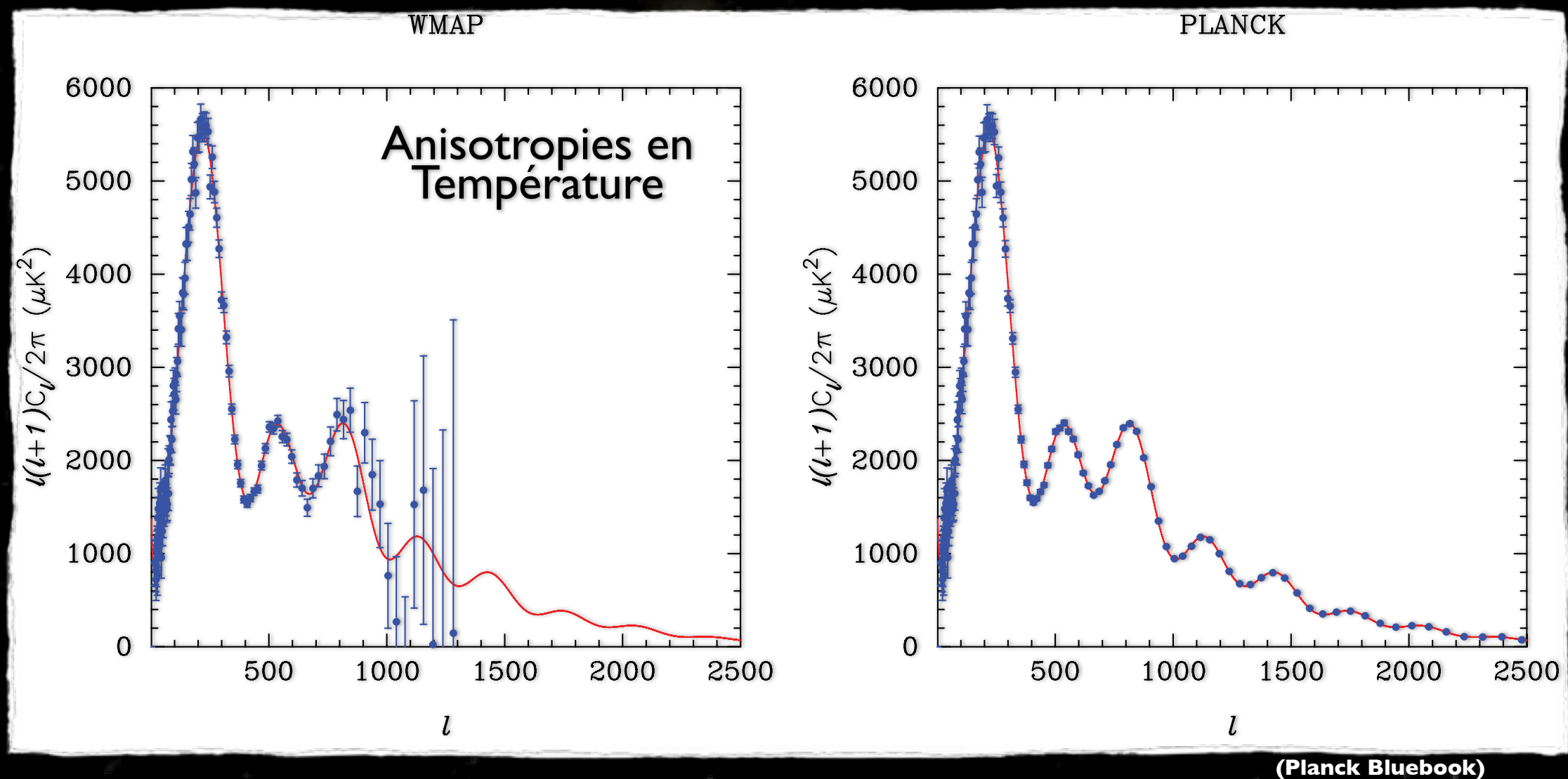
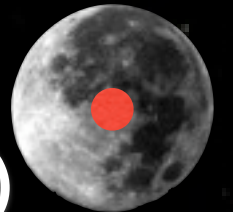
- Modèle standard de la cosmologie :  $\Lambda$ CDM
  - ★ L'Univers est en expansion
    - Constante de Hubble
  - ★ L'Univers est plat :  $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
  - ★ Il contient de la matière noire
    - quantité connue, nature inconnue
  - ★ Il contient de l'énergie sombre
    - quantité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



Crédits : CMB (T et E), SNIa et catalogues de galaxies et d'amas

# Ce que l'on saura après Planck

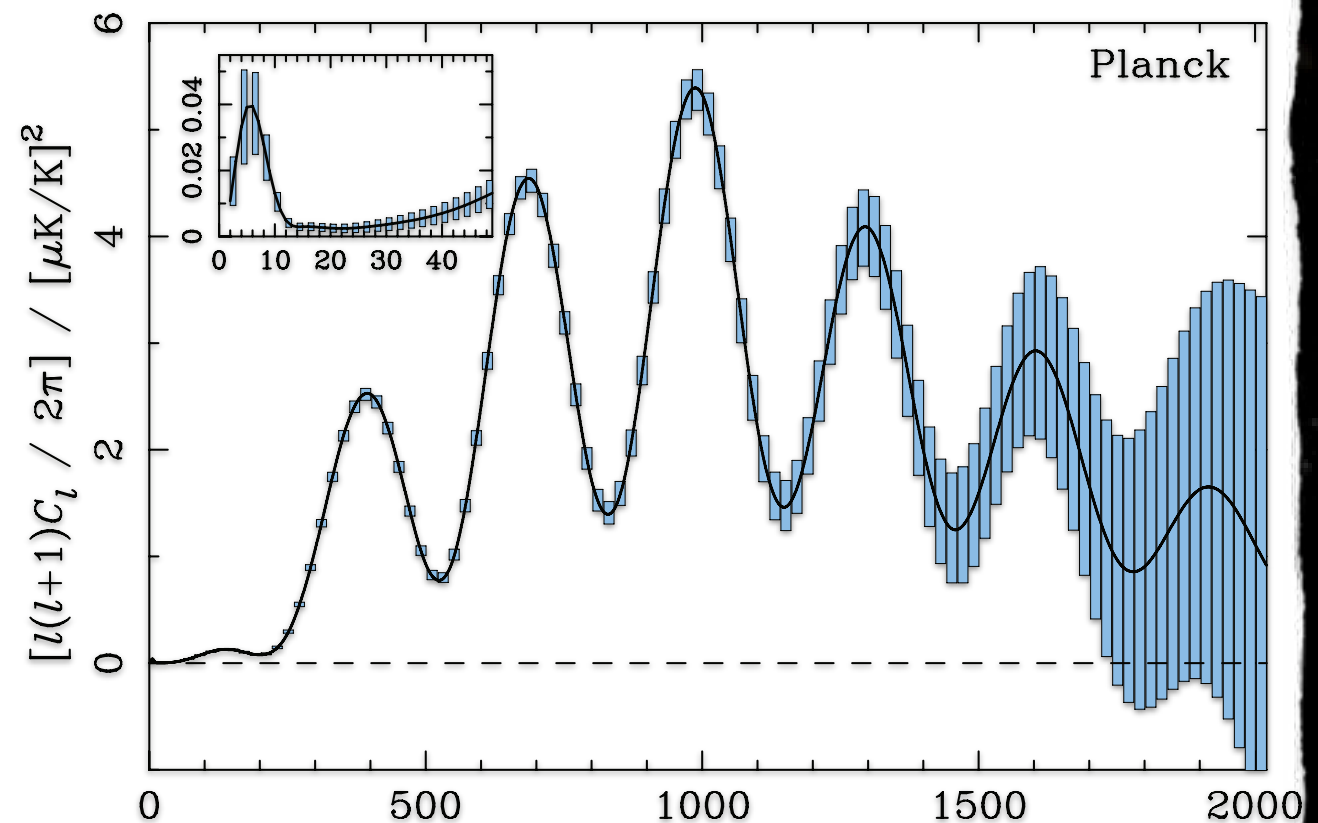
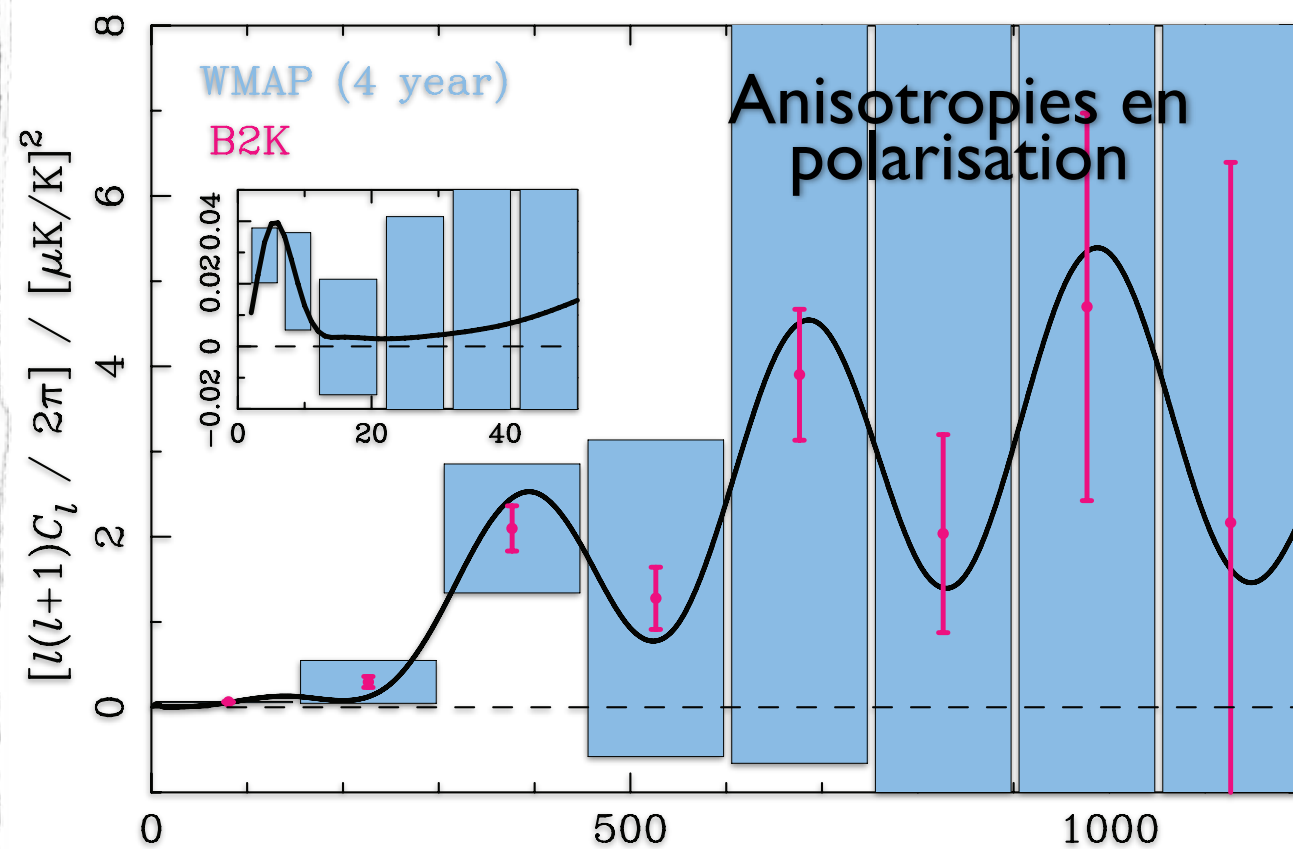
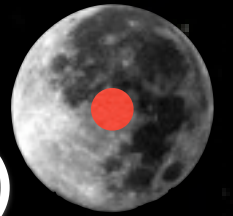
- Résolution angulaire : 5 arcminutes (1/6 de la lune)
- Sensibilité : 5 mK / pixel de résolution (0.0002 % sur 2.73 K)
- Gain d'un facteur 3-10 sur les paramètres cosmologiques





# Ce que l'on saura après Planck

- 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)



# Ce que l'on saura après Planck

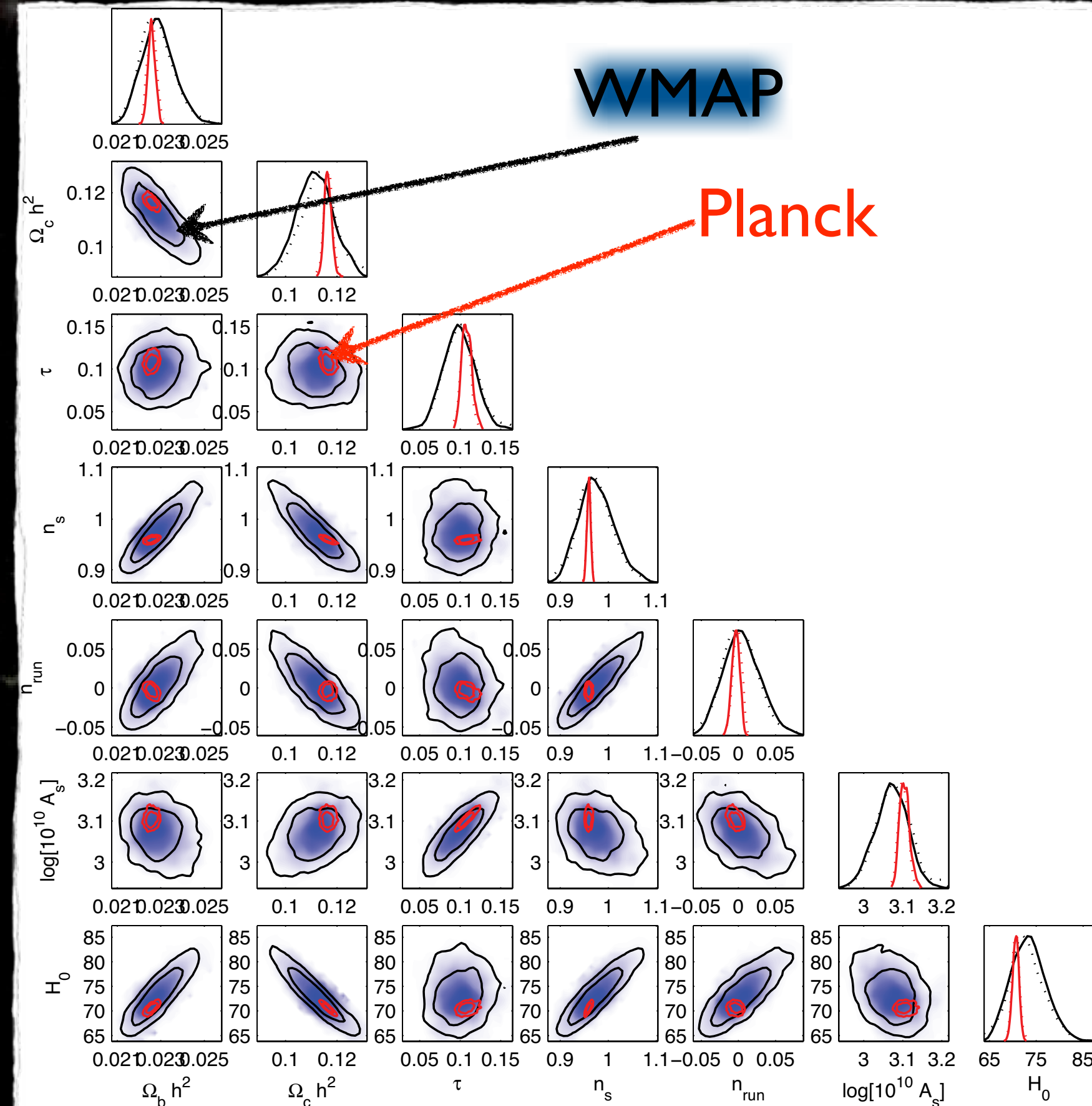
(Planck Bluebook)

WMAP

Planck

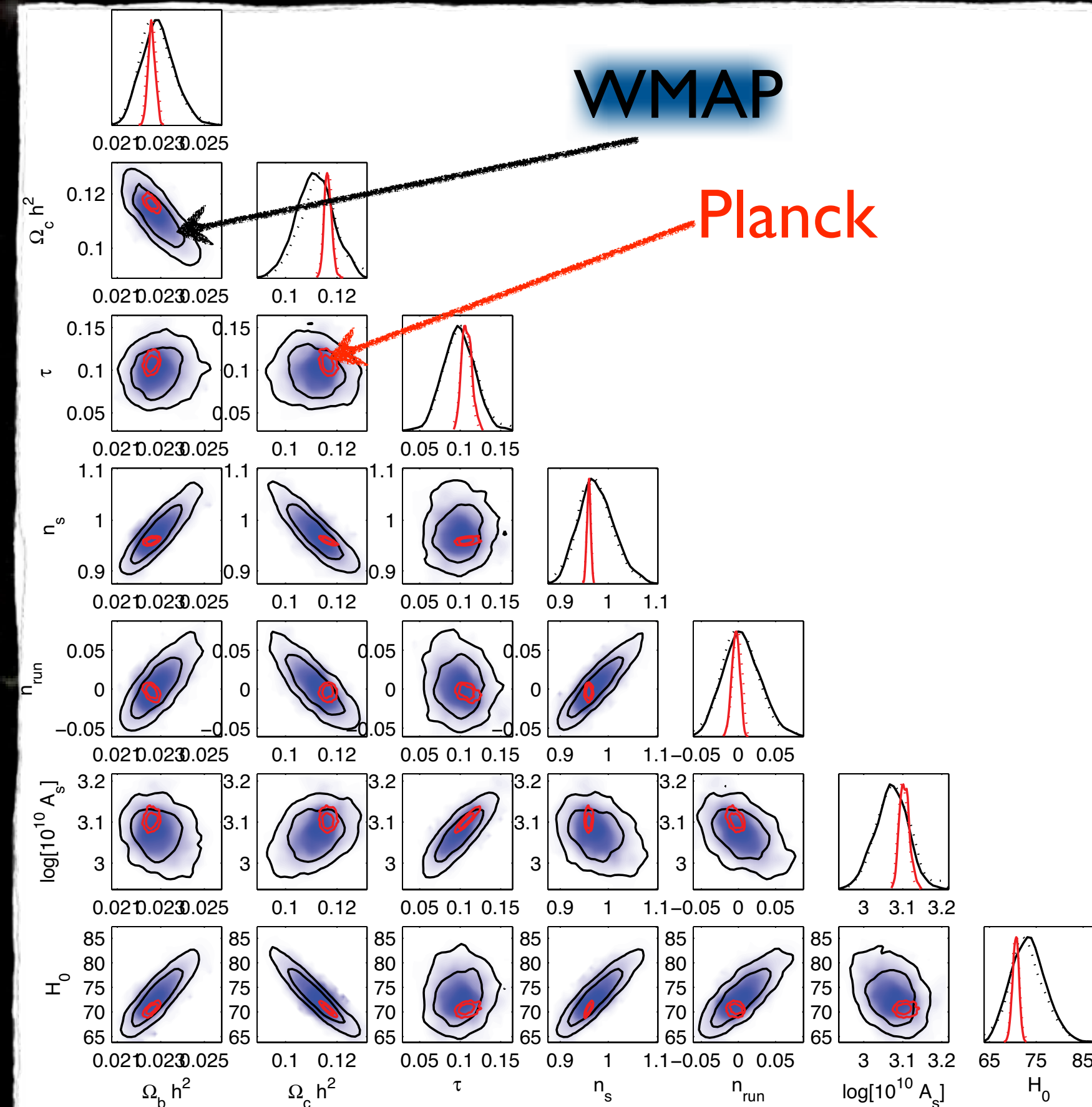
Qu'y a-t-il au delà ?

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



# Ce que l'on saura après Planck

(Planck Bluebook)



WMAP

Planck

**Qu'y a-t-il au delà ?**

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



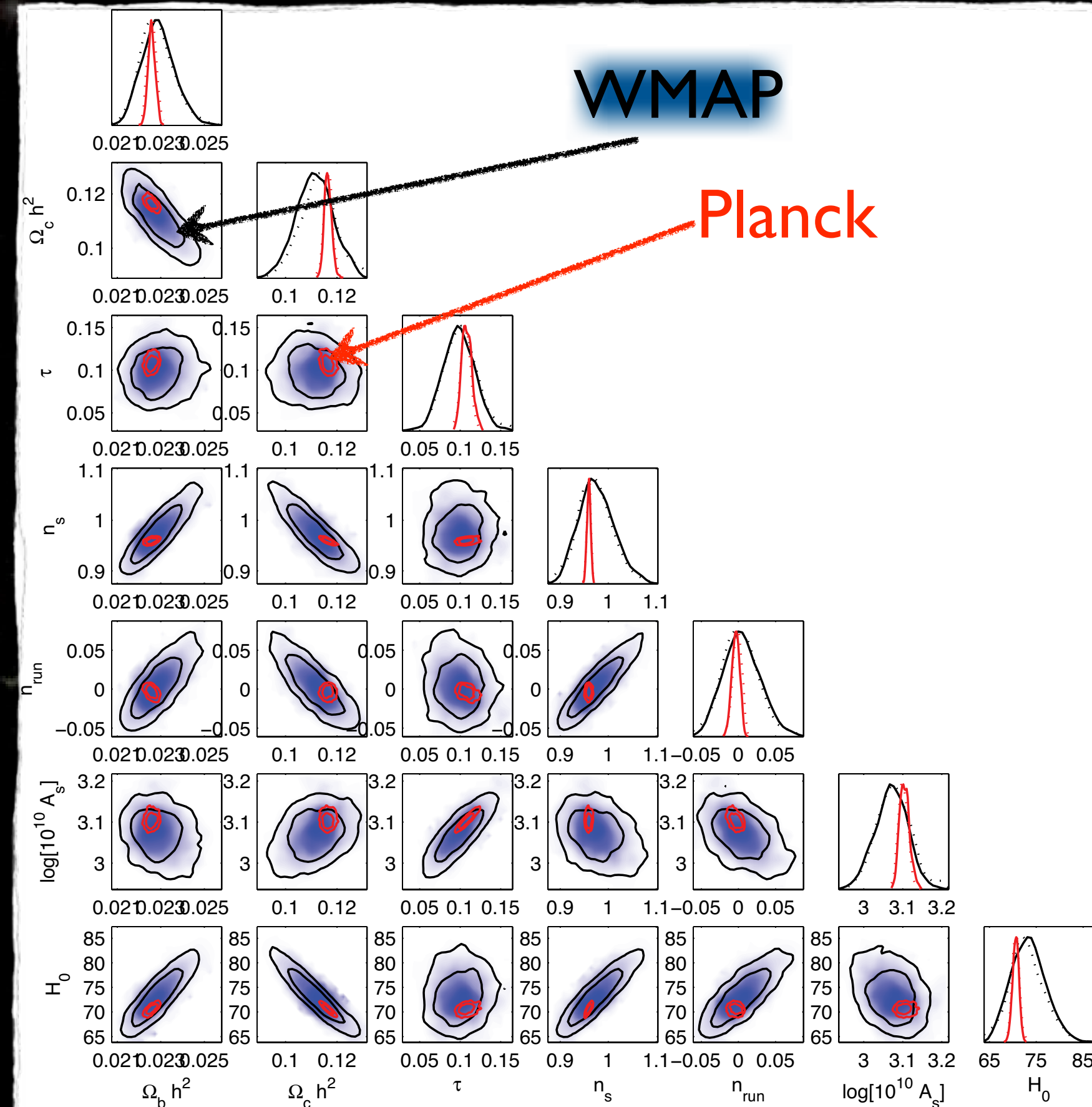
**D'où viennent les formes de spectre de CI que l'on ajuste sur les données ?**





# 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 !**



# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires



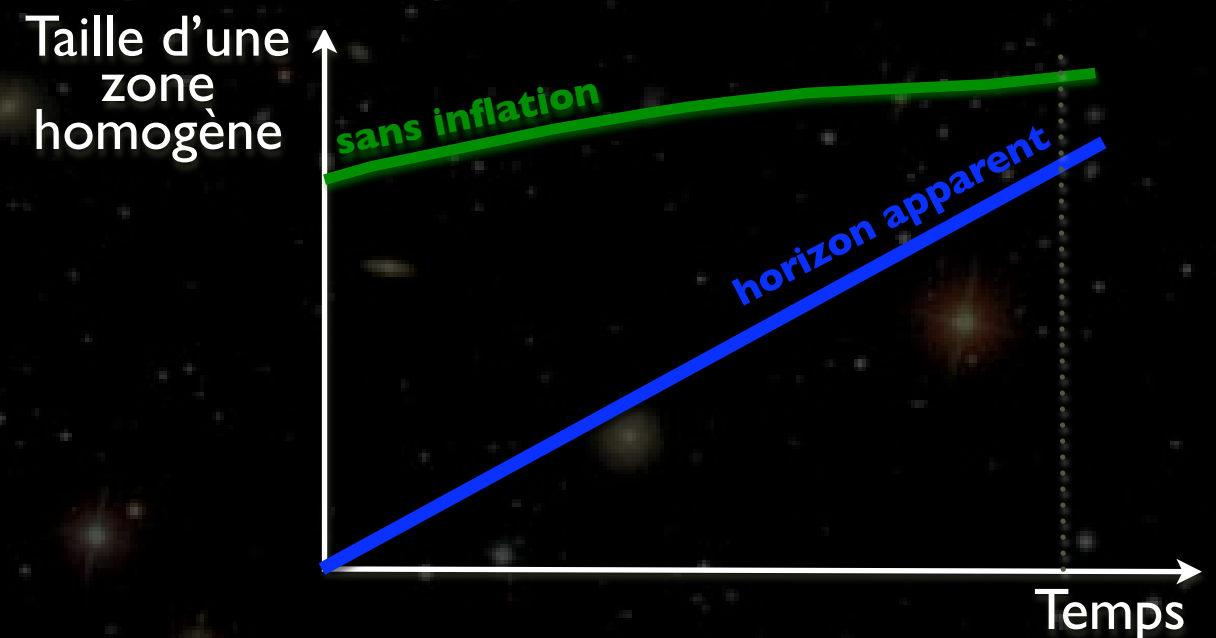
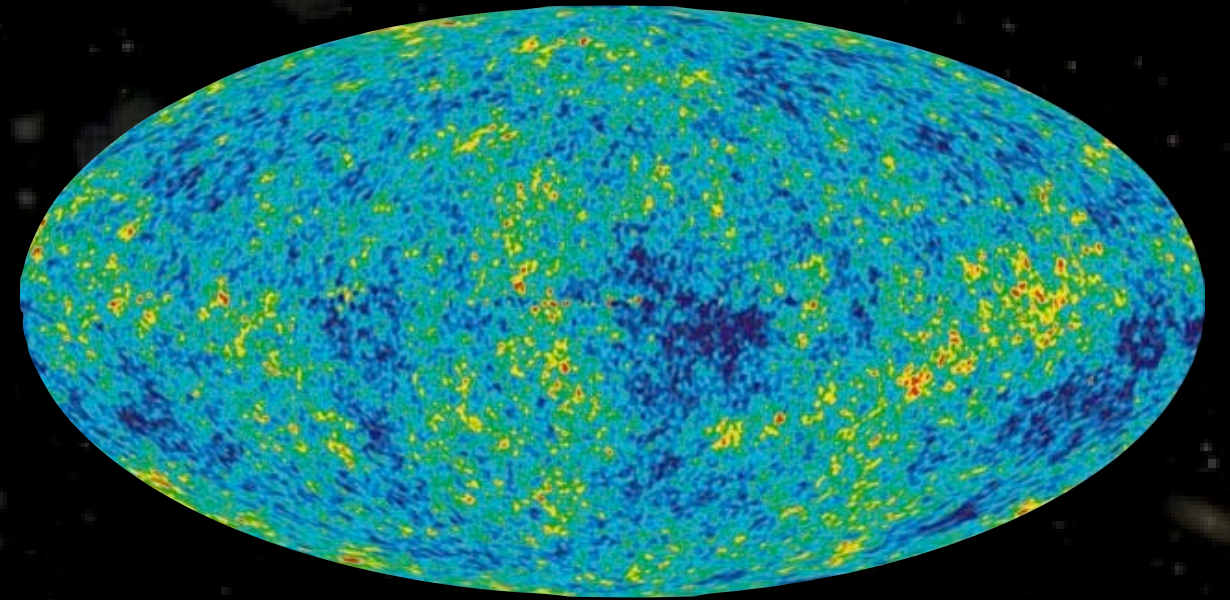
# L'inflation

- 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

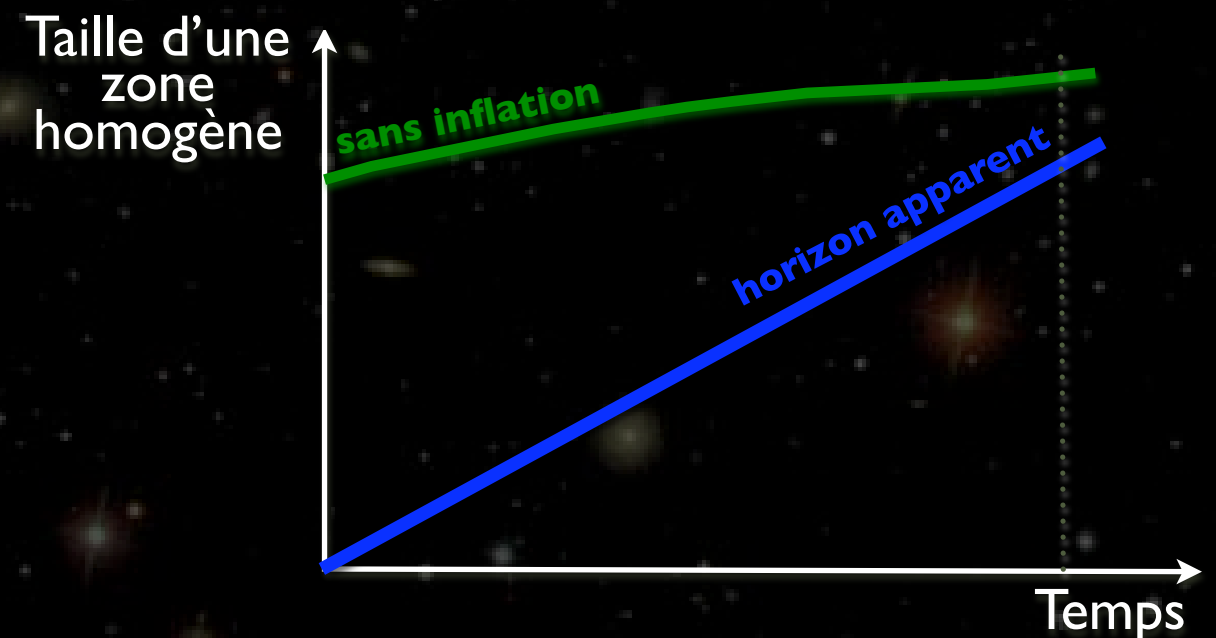
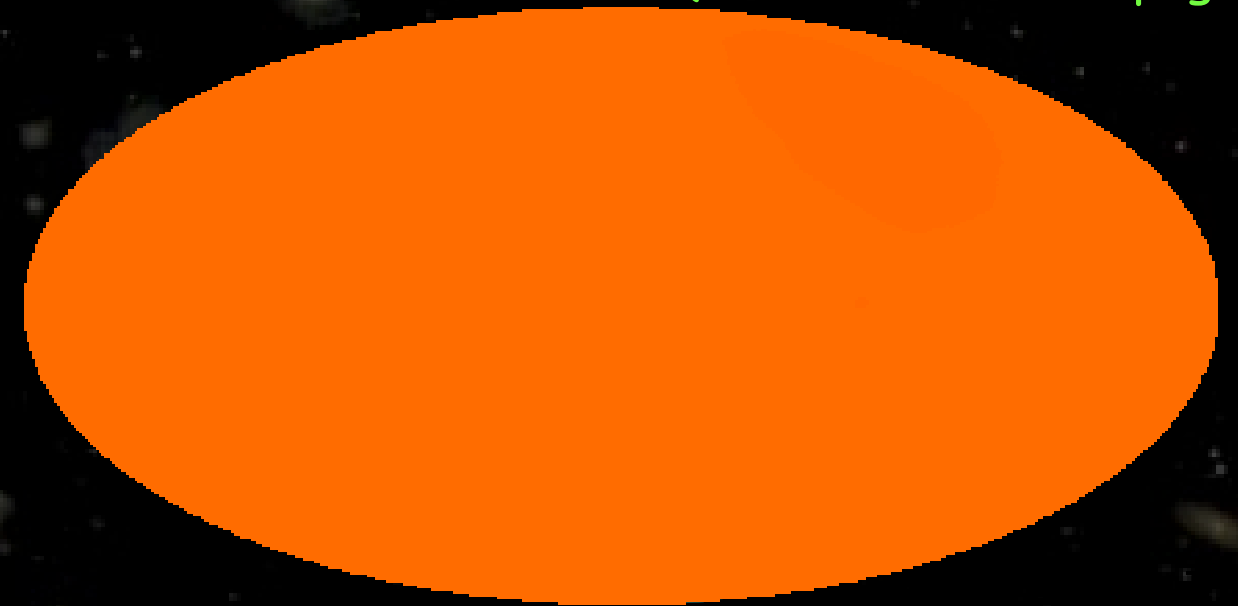
- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était  $\sim 1$  degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**





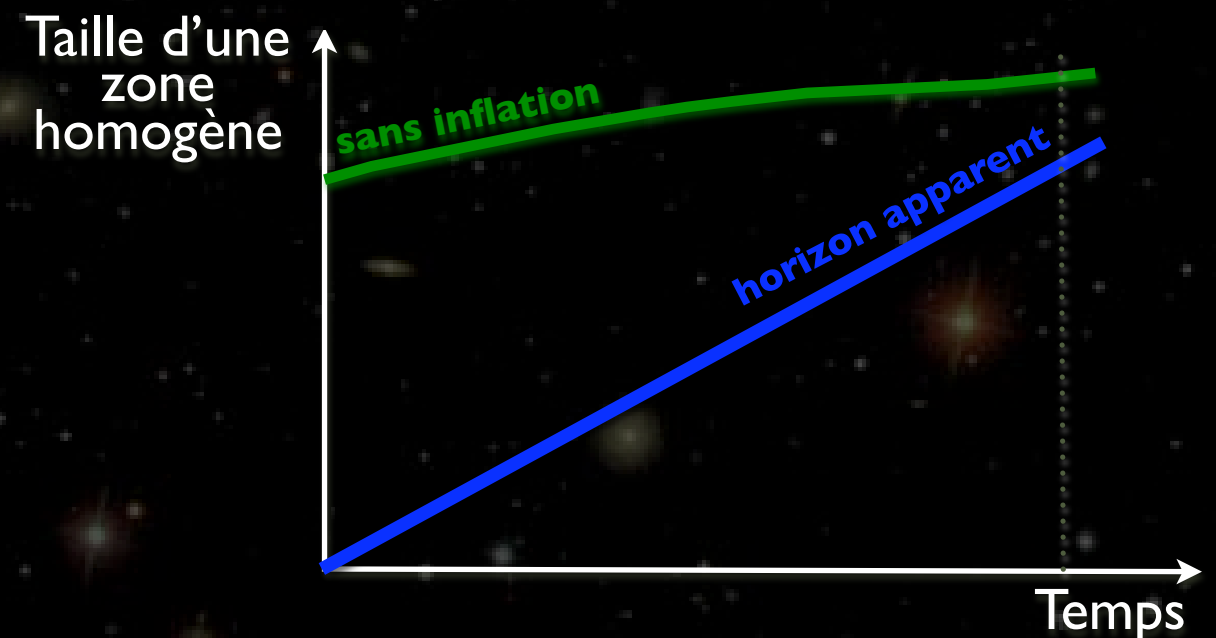
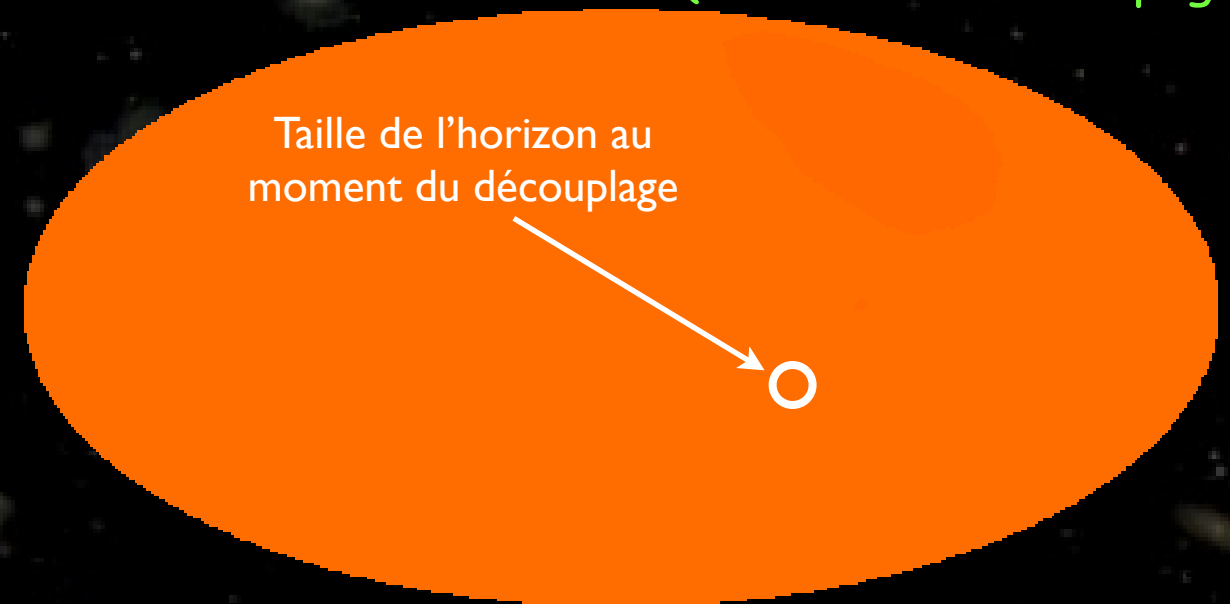
# Problème de l'horizon

- 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  $\sim 1$  degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



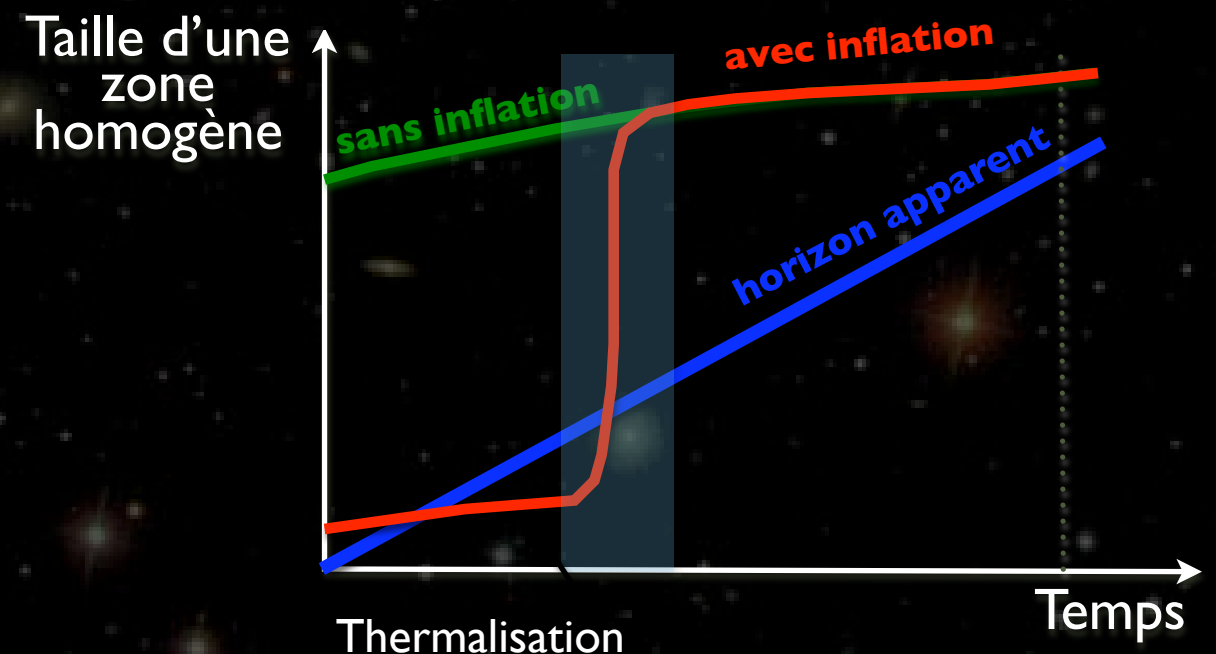
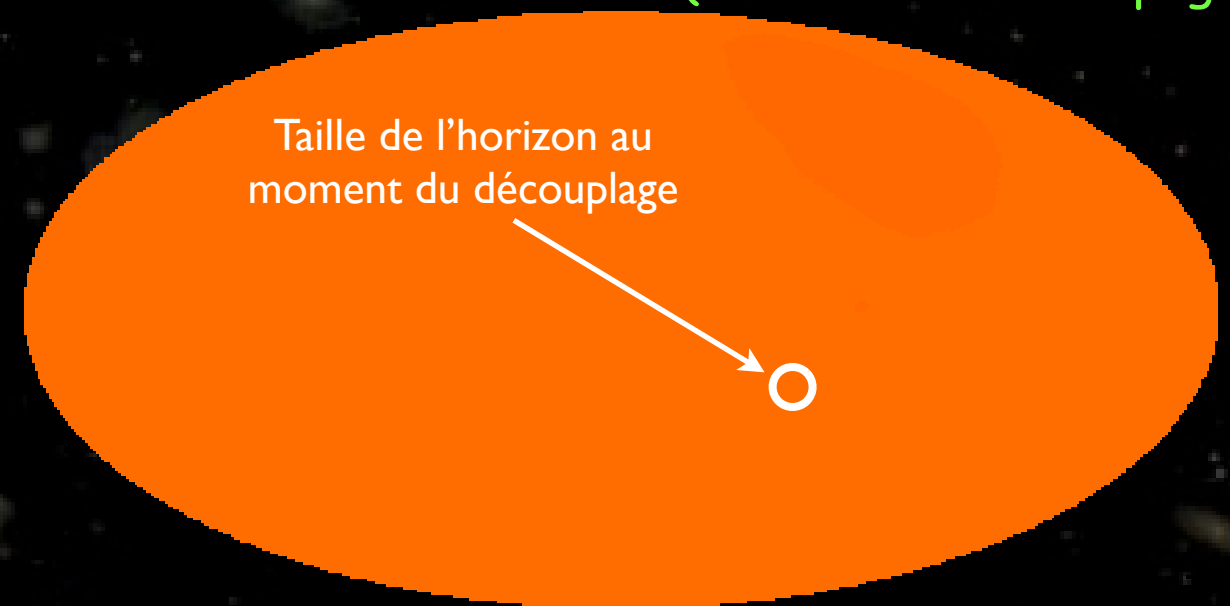
# Problème de l'horizon

- 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  $\sim 1$  degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



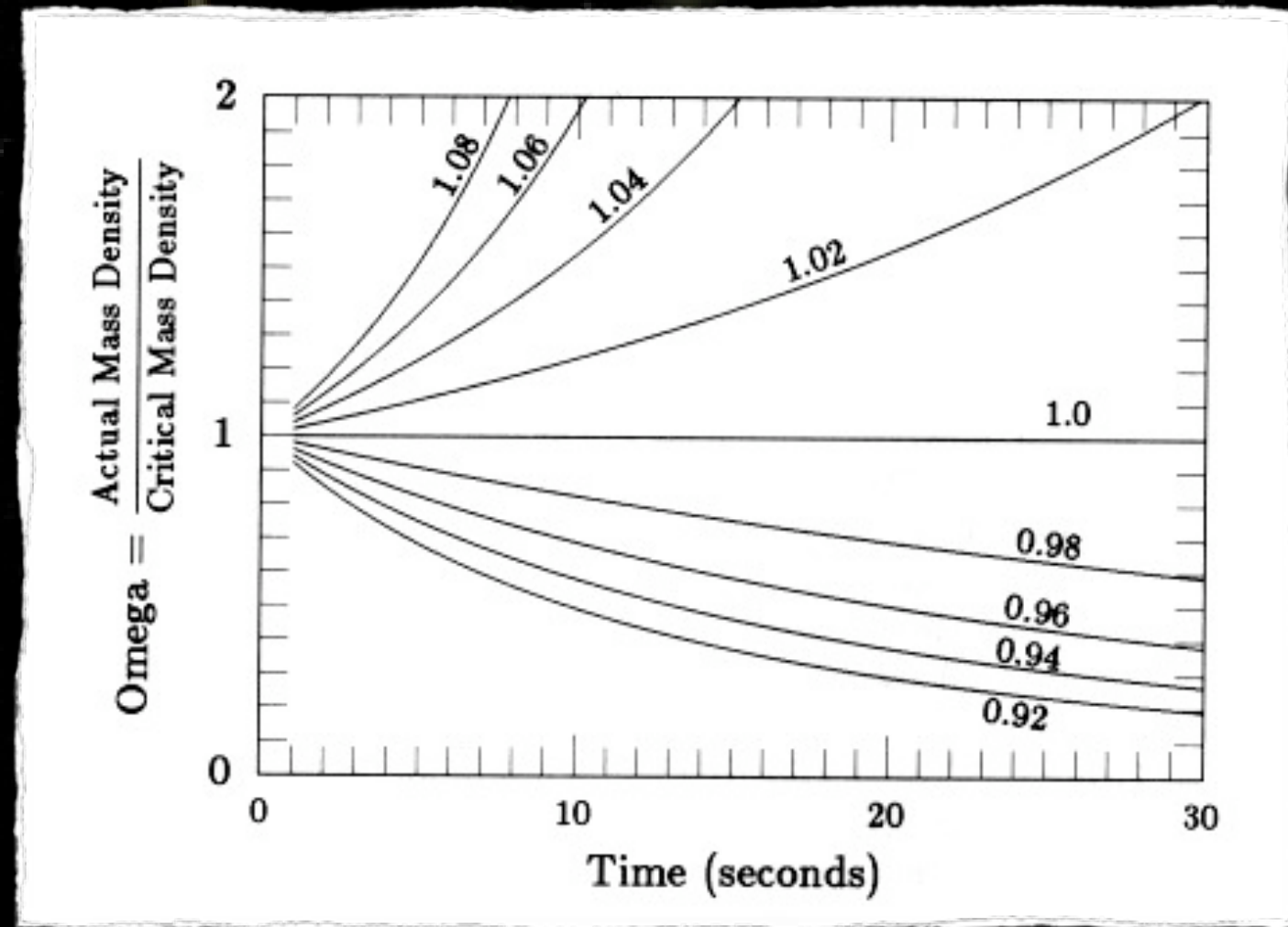
# Problème de l'horizon

- 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  $\sim 1$  degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**

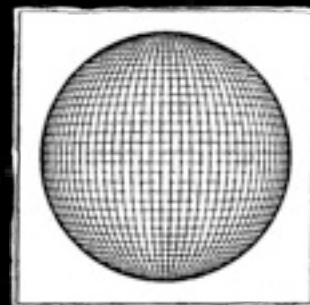


# Problème de la platitude

- $\Omega_{\text{tot}}=1$  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**



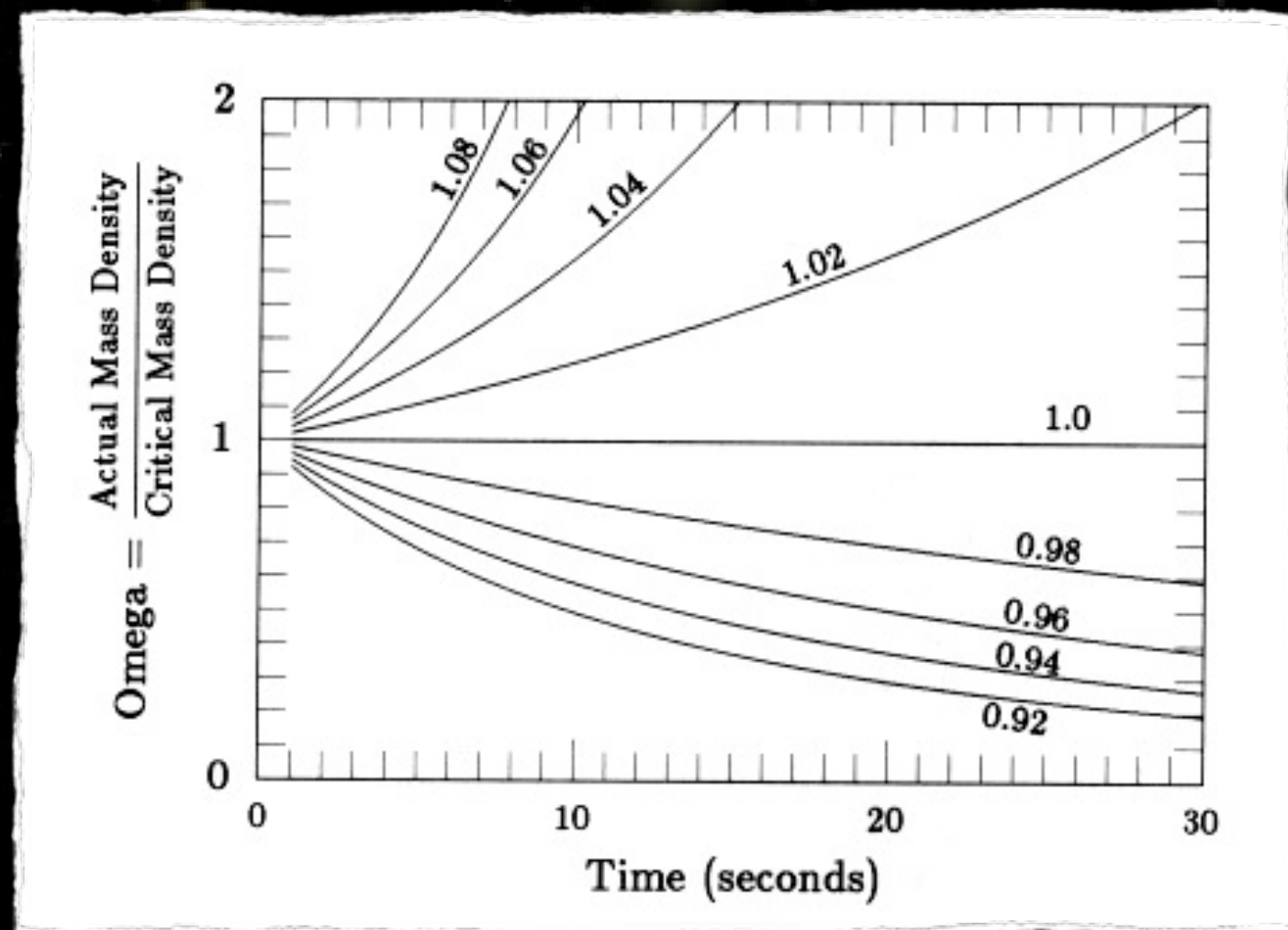
A. Guth



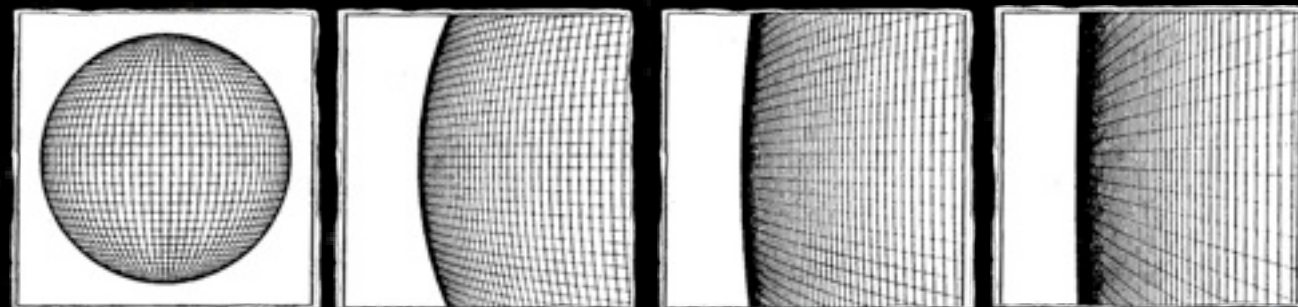
# Problème de la platitude

- $\Omega_{\text{tot}}=1$  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**

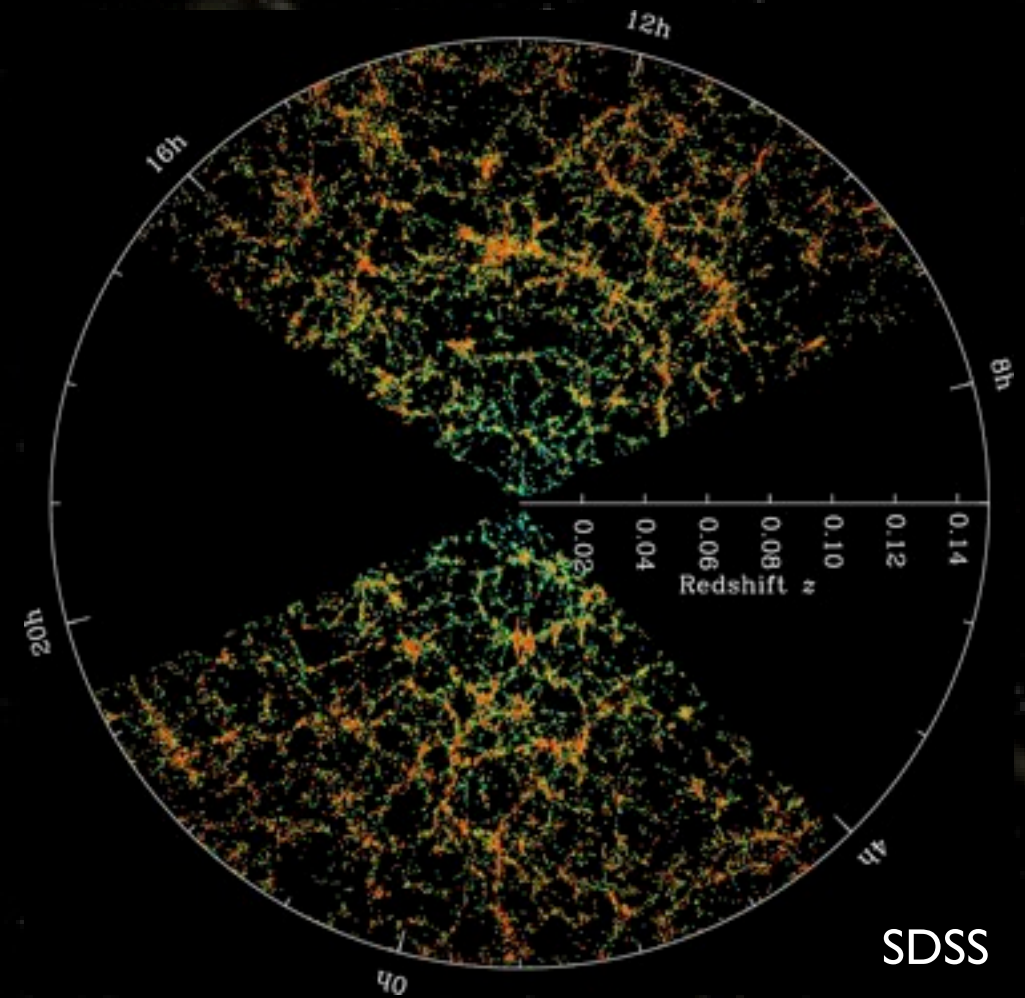


A. Guth



# D'où viennent les structures ?

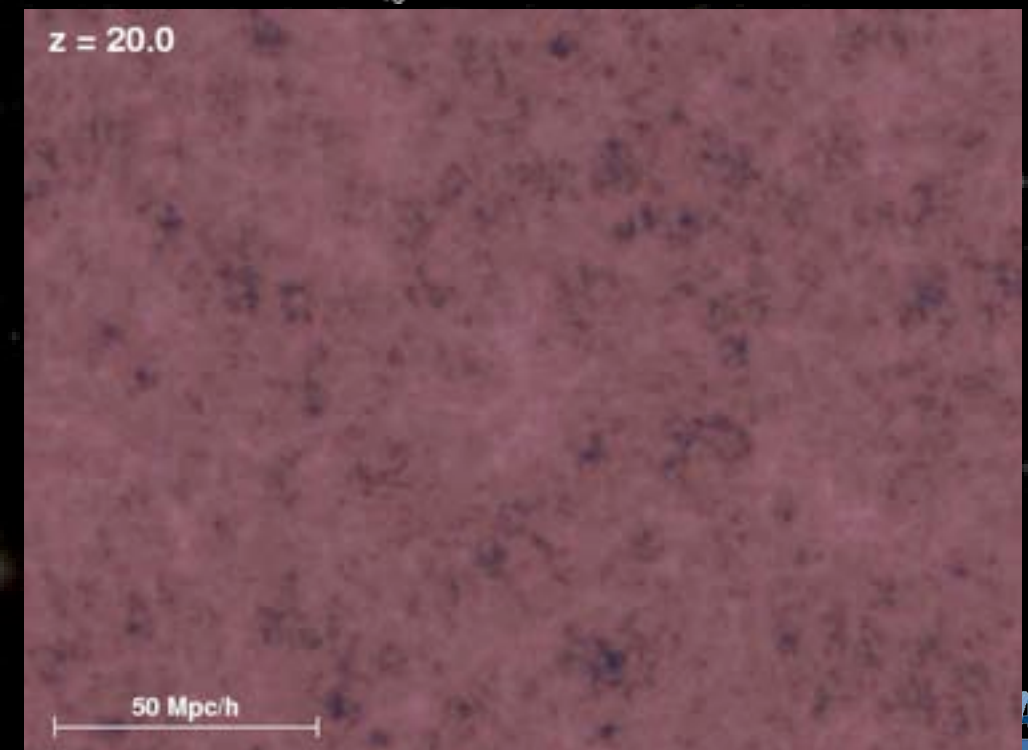
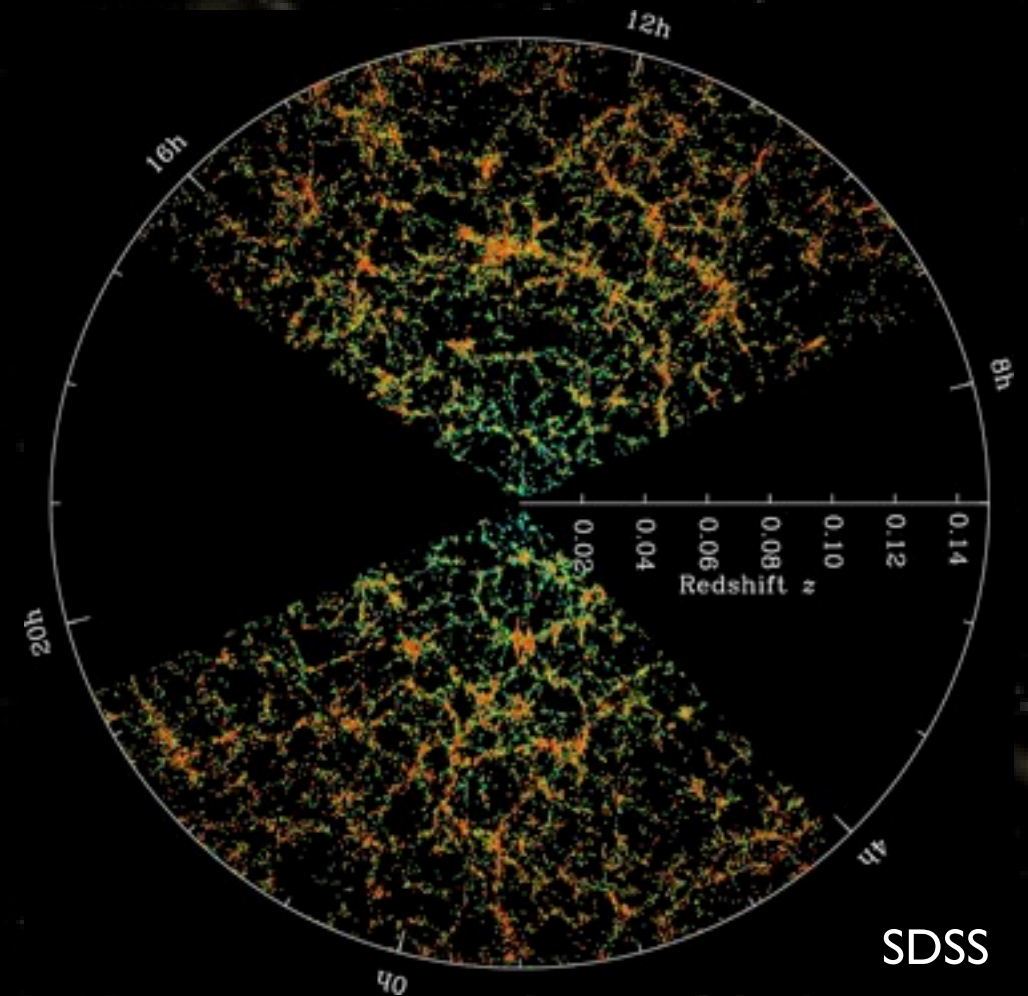
- On observe de nombreuses structures denses autour de nous (galaxies, amas, filaments)
- le Big-Bang «simple» n'explique pas leur origine
- si on «suppose» les graines alors on explique bien les structures
- Deux alternatives :
  - ★ conditions initiales ad-hoc
  - ★ processus permettant de les générer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





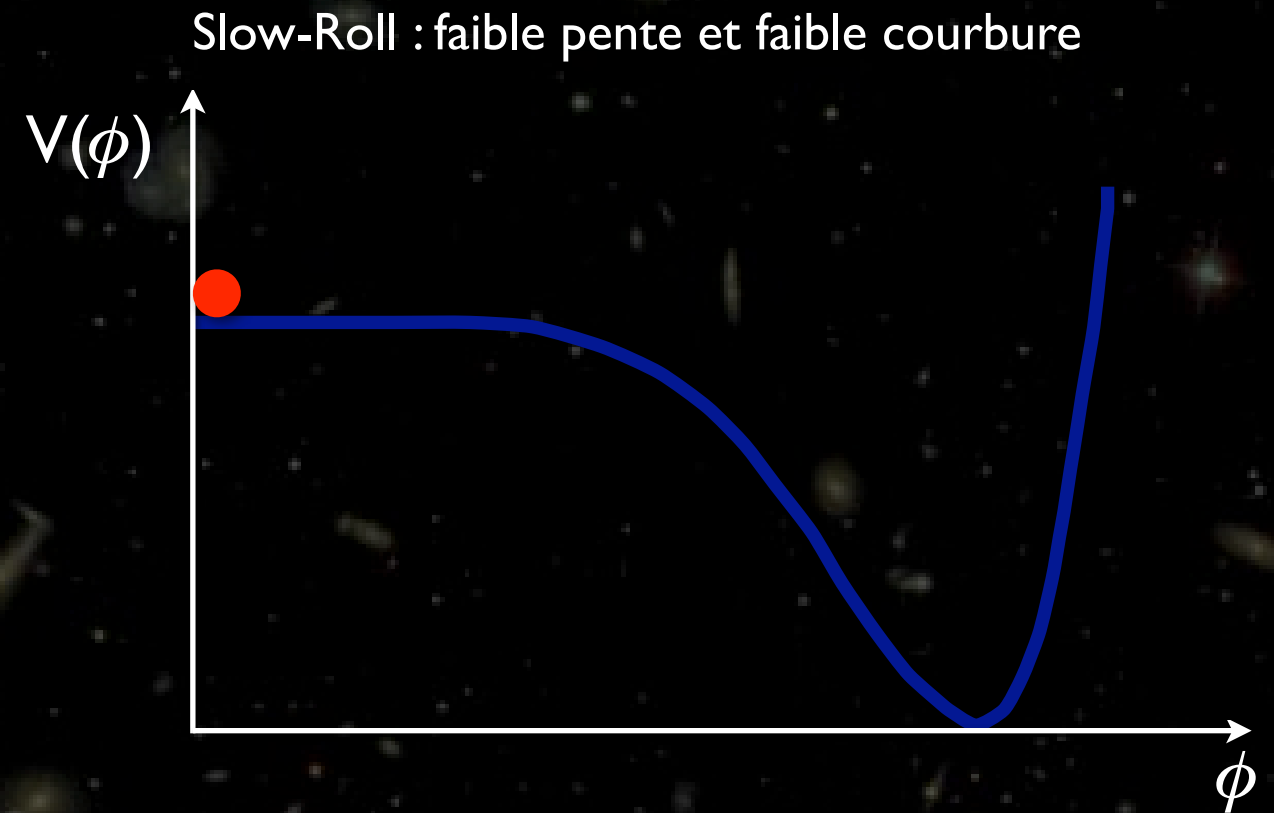
# D'où viennent les structures ?

- 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

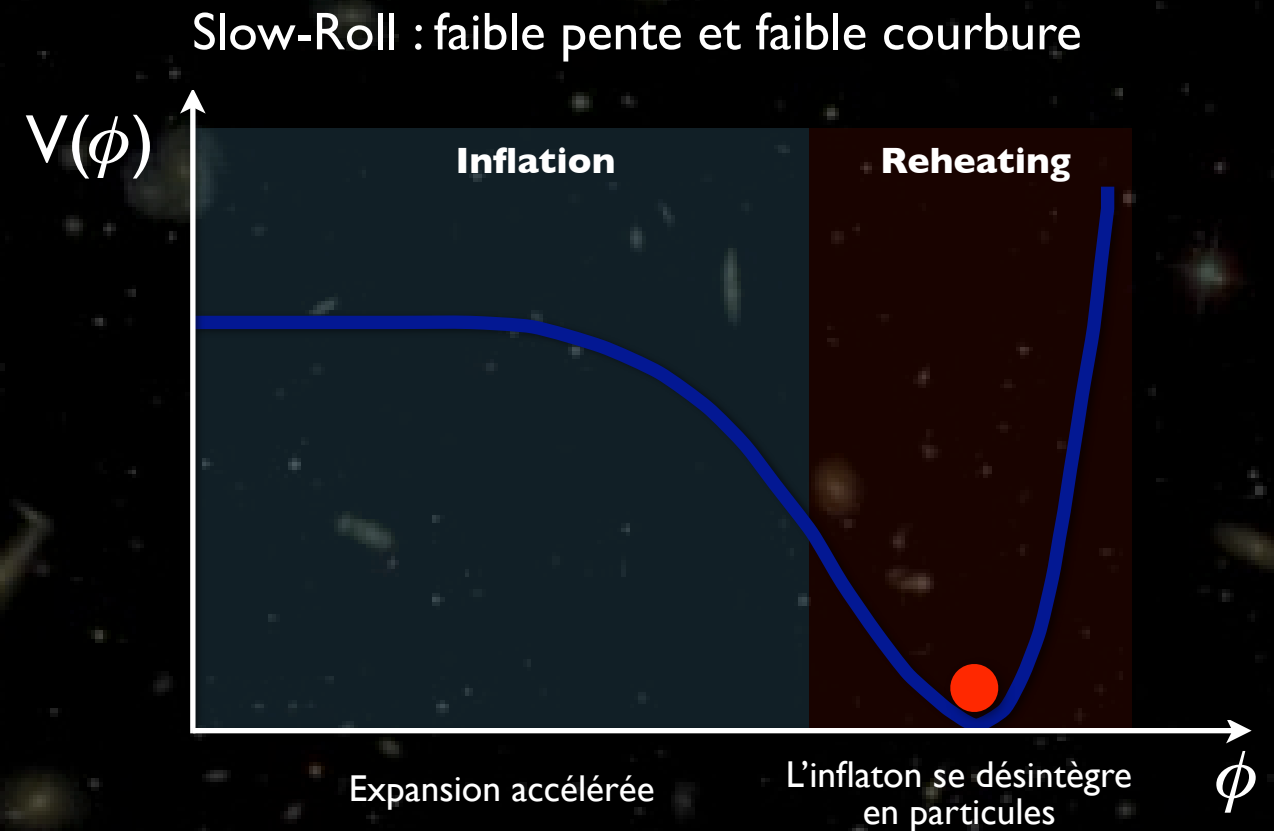
- Un champ scalaire, l'inflaton, domine l'Univers primordial
- Potentiel de slow-roll  
⇒ expansion accélérée ⇔ inflation
- L'inflation s'arrête quand le champ approche de son minimum  
⇒ Reheating : production de particules
- L'univers suit alors une évolution classique





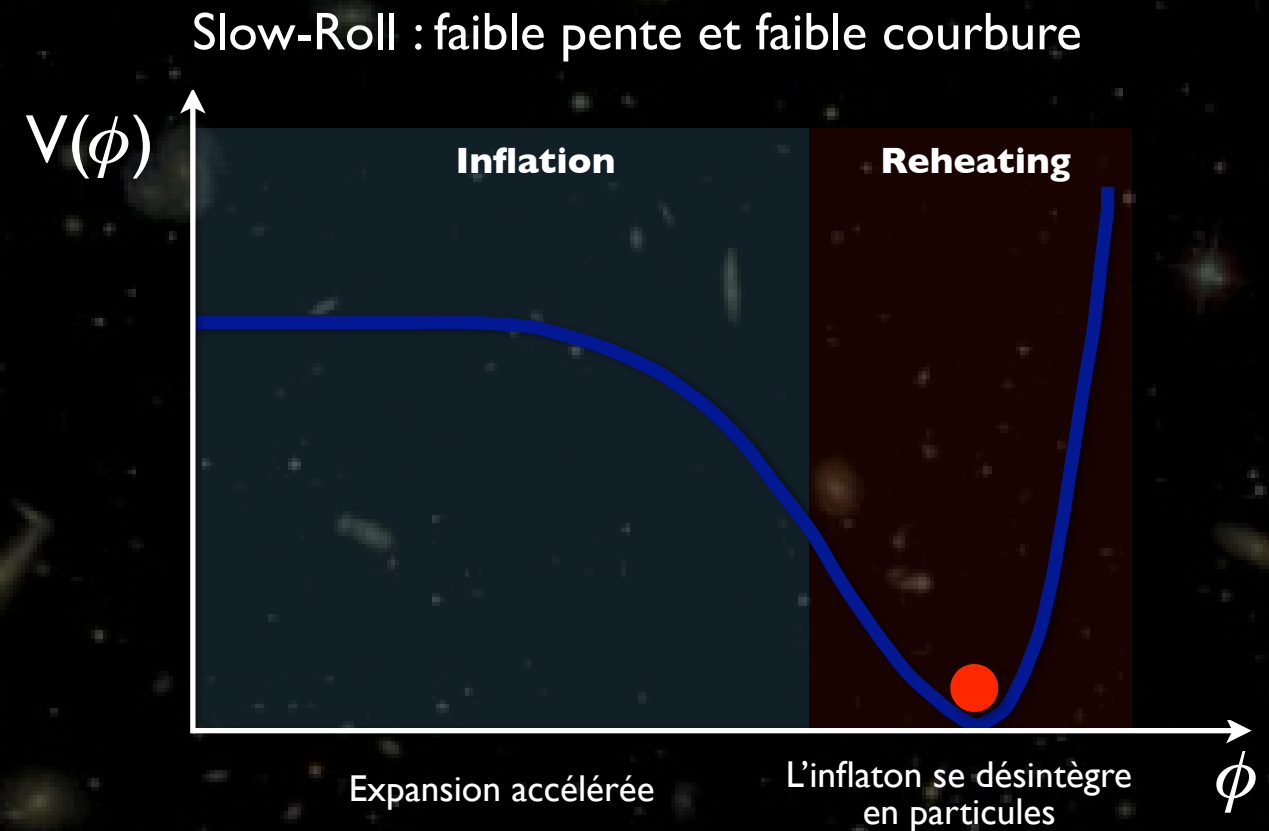
# La Phase d'inflation

- 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



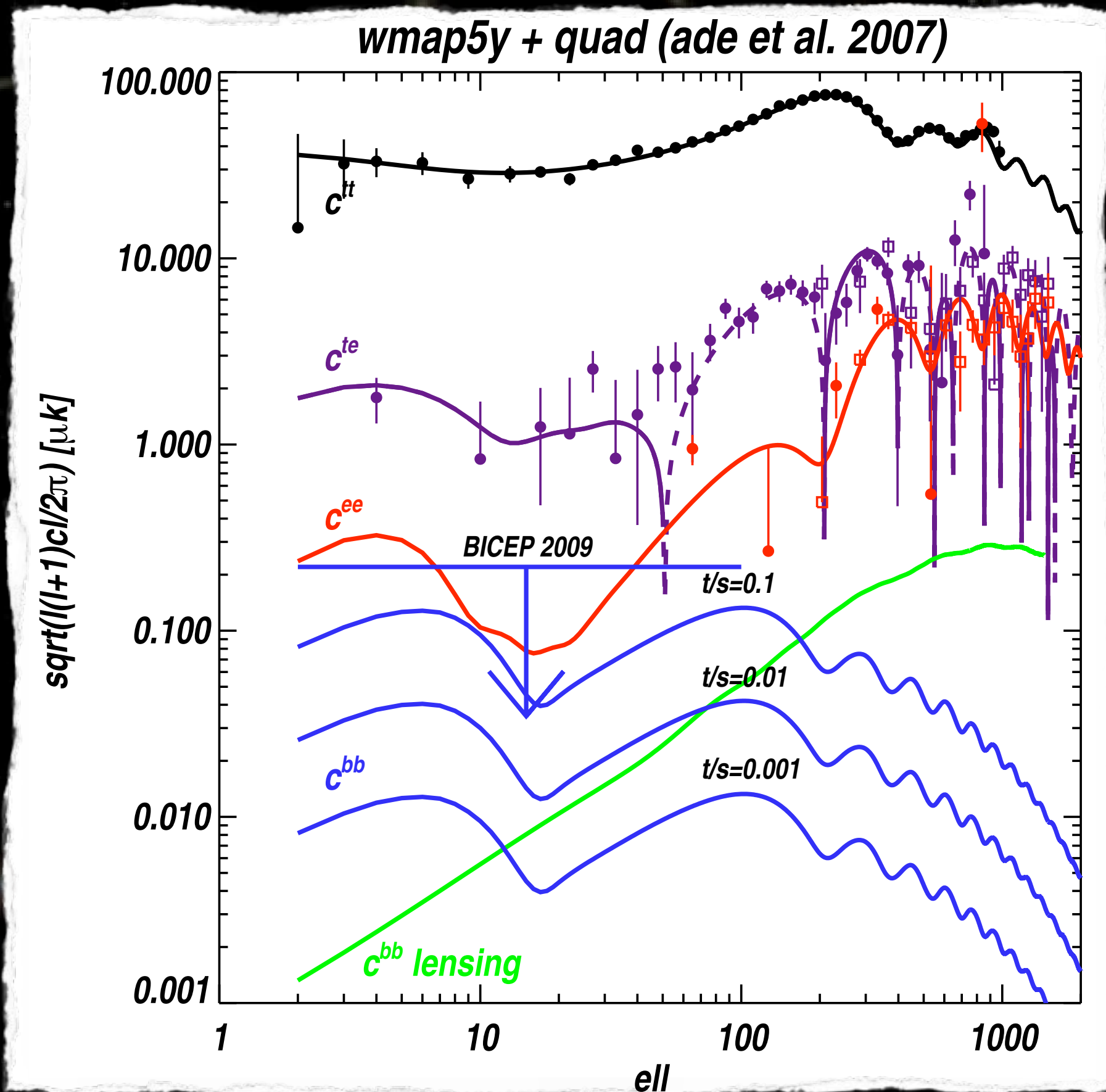
les fluctuations quantiques du potentiel de l'inflaton sont «grossies» par l'inflation et donnent des fluctuations macroscopiques dont on peut prédire la forme

⇒ graines pour la formation des structures

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

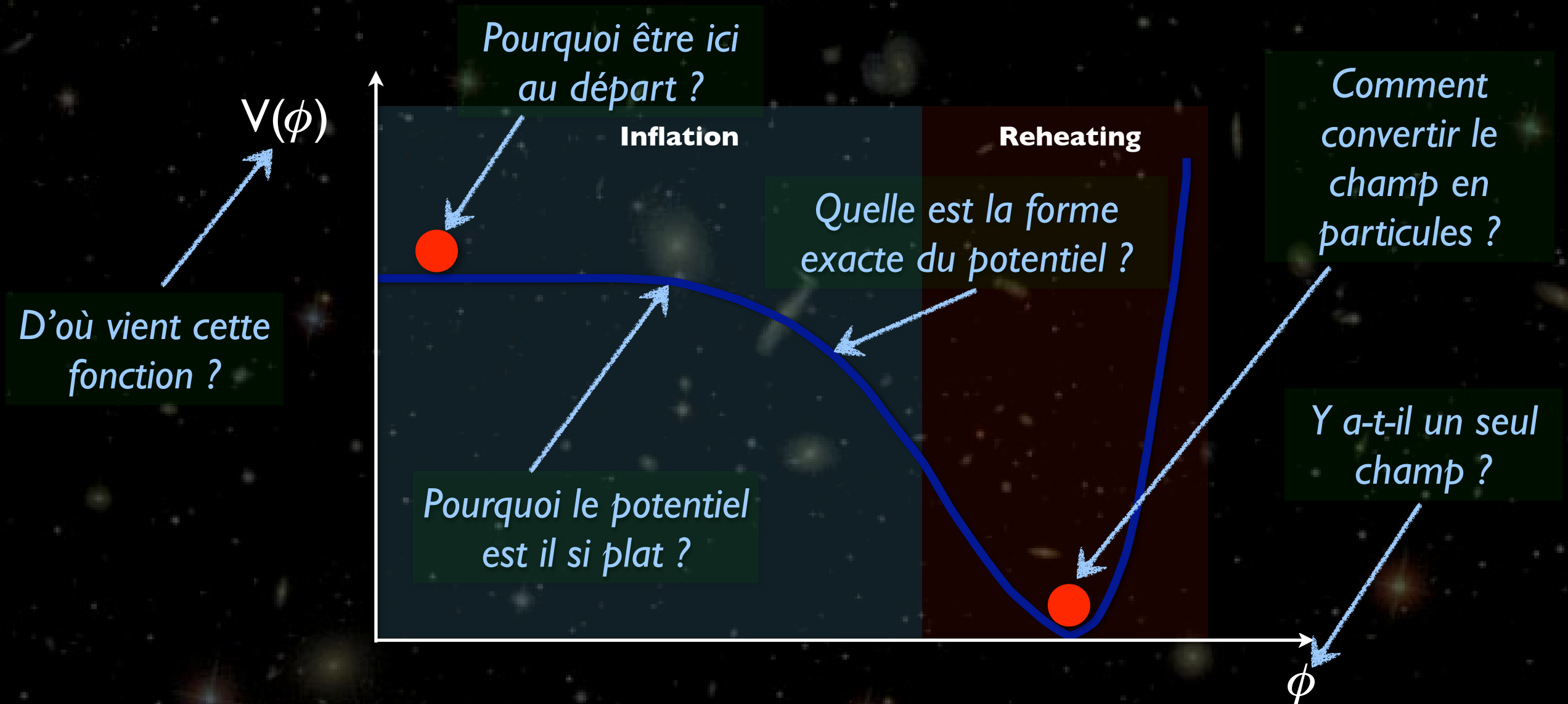


# Prédictions de l'inflation



# Beaucoup de questions

a.k.a. «rien n'est gratuit dans ce bas monde»



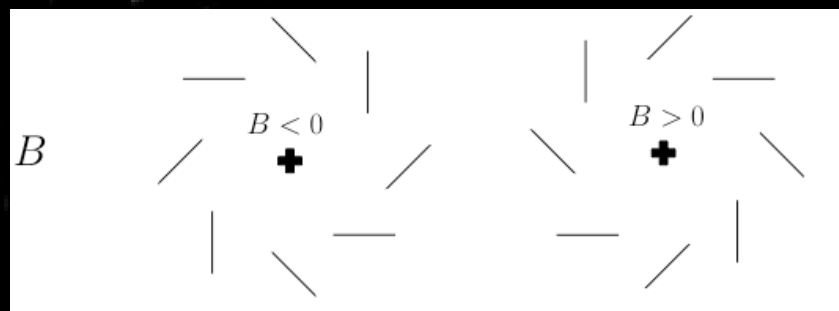
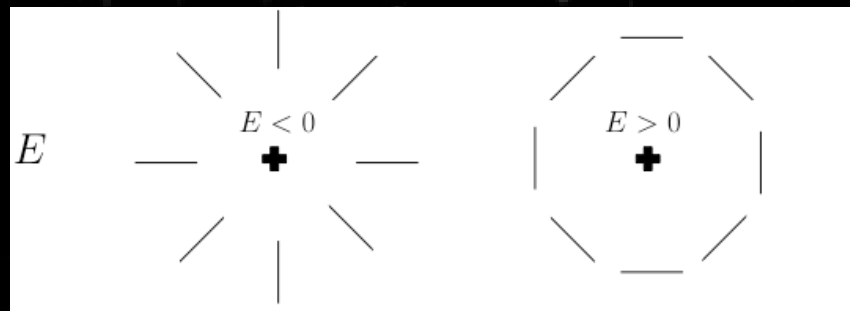
*Le CMB (température et polarisation) contient des réponses à ces questions fondamentales mais actuellement, presque tous les modèles d'inflation sont compatibles avec les données*



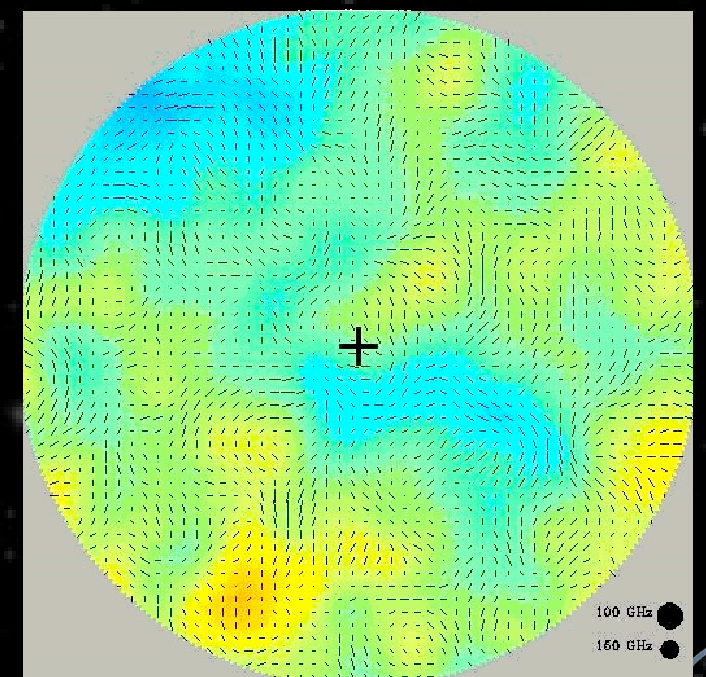
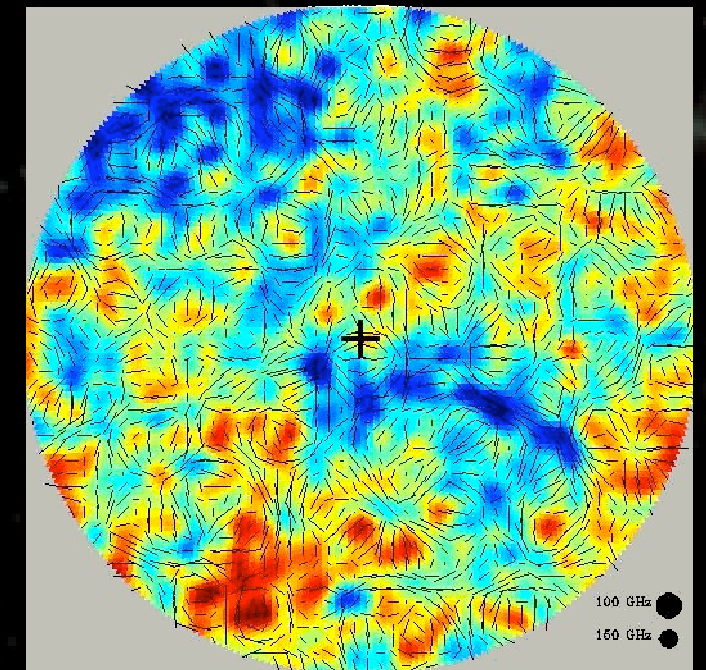


# Prédiction de l'inflation : MODES Scalaires & tenseurs

## Polarisation E & B



E. Hivon



### ● Perturbations scalaires

#### ★ Fluctuations de densité

- Température
- Polarisation E
- Pas de Polarisation B

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

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

### ● Perturbations tensorielles

#### ★ Ondes gravitationnelles primordiales

- Température
- Polarisation E
- Polarisation B

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

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

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

**Seuls les modes Tenseurs produisent de la polarisation B**



# Prouver l'inflation ?

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

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

$$P_r(k) = A_t \left( \frac{k}{k_0} \right)^{n_t}$$

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

rapport entre  
modes B et E



# Prouver l'inflation ?

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

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

amplitude

$$P_r(k) = A_t \left( \frac{k}{k_0} \right)^{n_t}$$

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

rapport entre  
modes B et E



# Prouver l'inflation ?

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

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

Diagram illustrating the relationship between the scalar and tensor power spectra and the tensor-to-scalar ratio  $r$ .

Annotations:

- $A_s$ : amplitude
- $n_s - 1$ : forme du spectre
- $A_t$ : amplitude
- $n_t$ : forme du spectre

Equation for the tensor-to-scalar ratio:

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

rapport entre modes B et E





# Prouver l'inflation ?

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

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

Diagram illustrating the spectral indices and amplitude for scalar and tensor modes:

- $A_s$  is labeled **amplitude** (blue box).
- $n_s - 1$  is labeled **forme du spectre** (red box).
- $A_t$  is labeled **amplitude** (blue box).
- $n_t$  is labeled **forme du spectre** (red box).

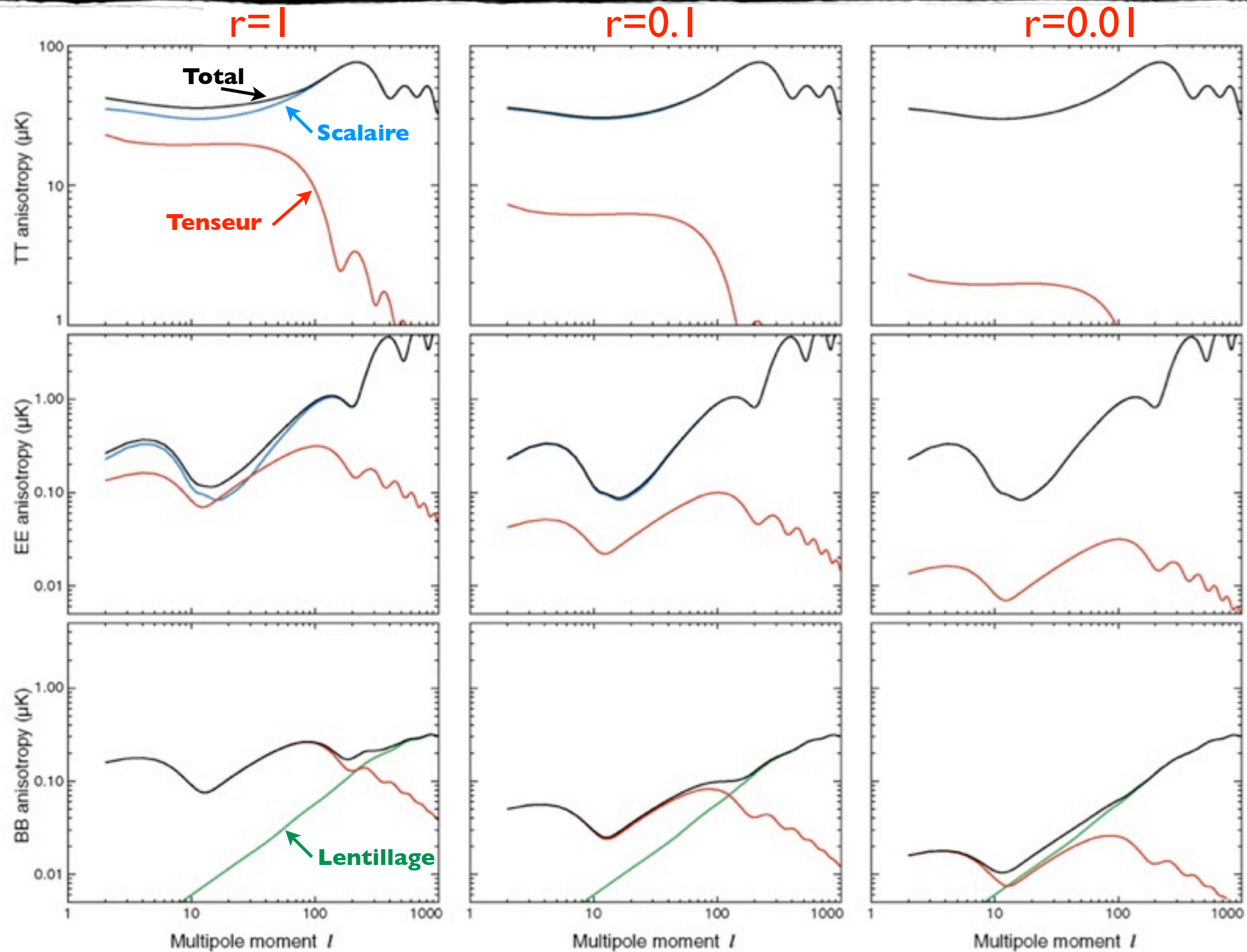
The ratio  $r = \frac{P_t(k_0)}{P_s(k_0)}$  is labeled **rapport entre modes B et E** (green box).

⇒ **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

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

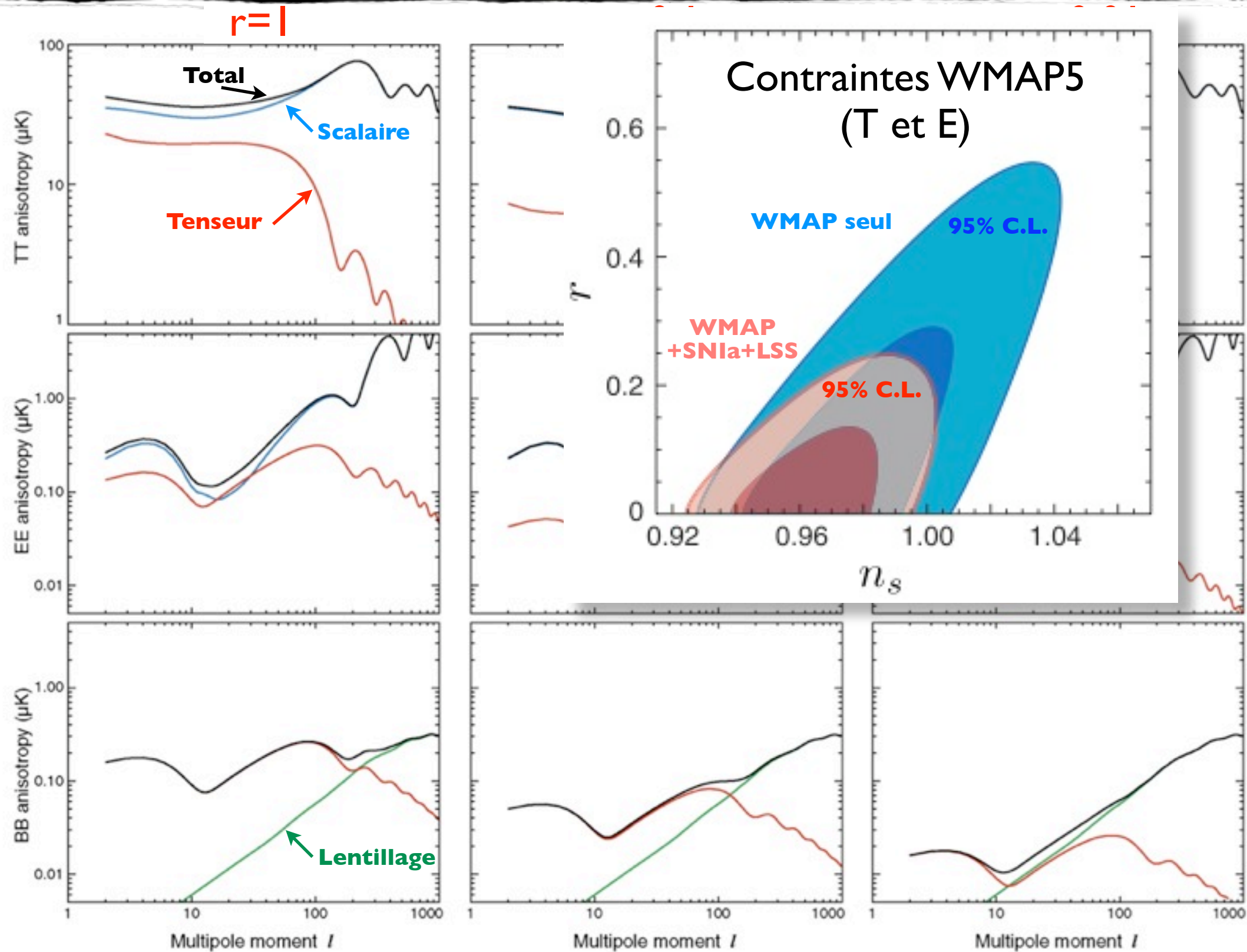




c/o Gary Hinshaw

**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**





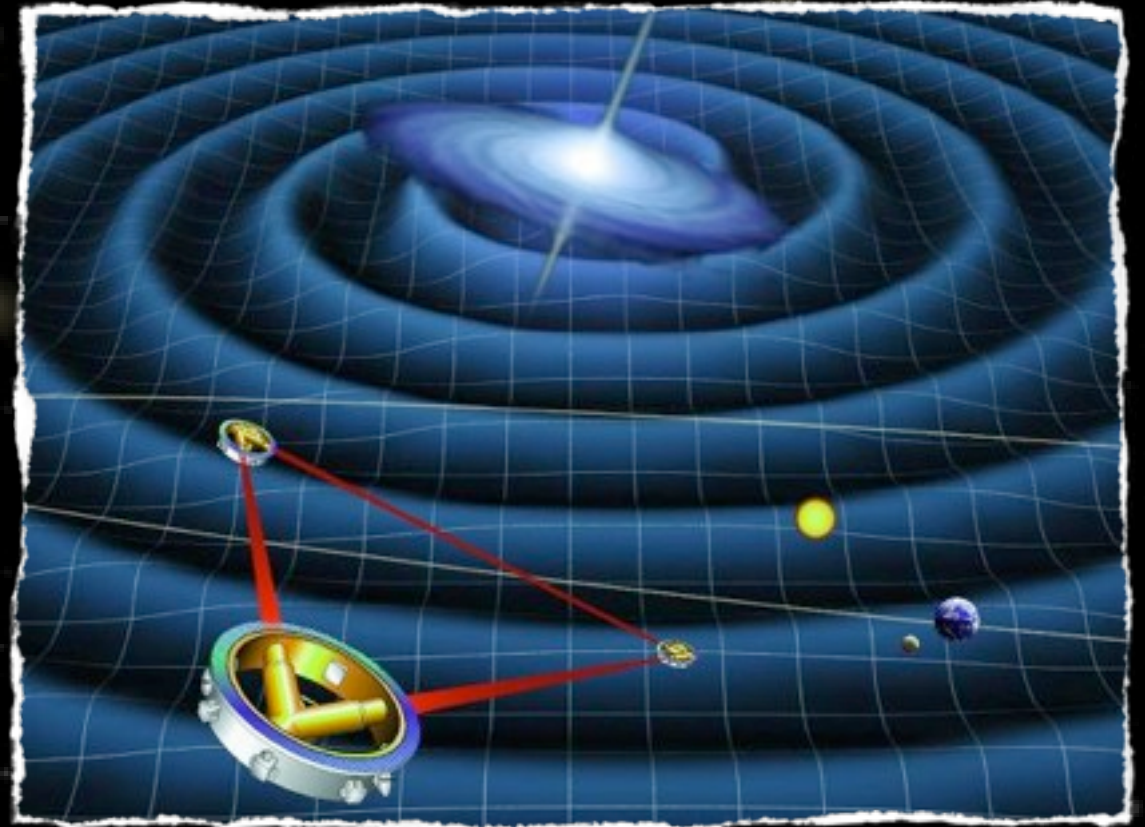
# Seule autre approche

- Détecteurs directs d'ondes Gravitationnelles :

Virgo/Ligo



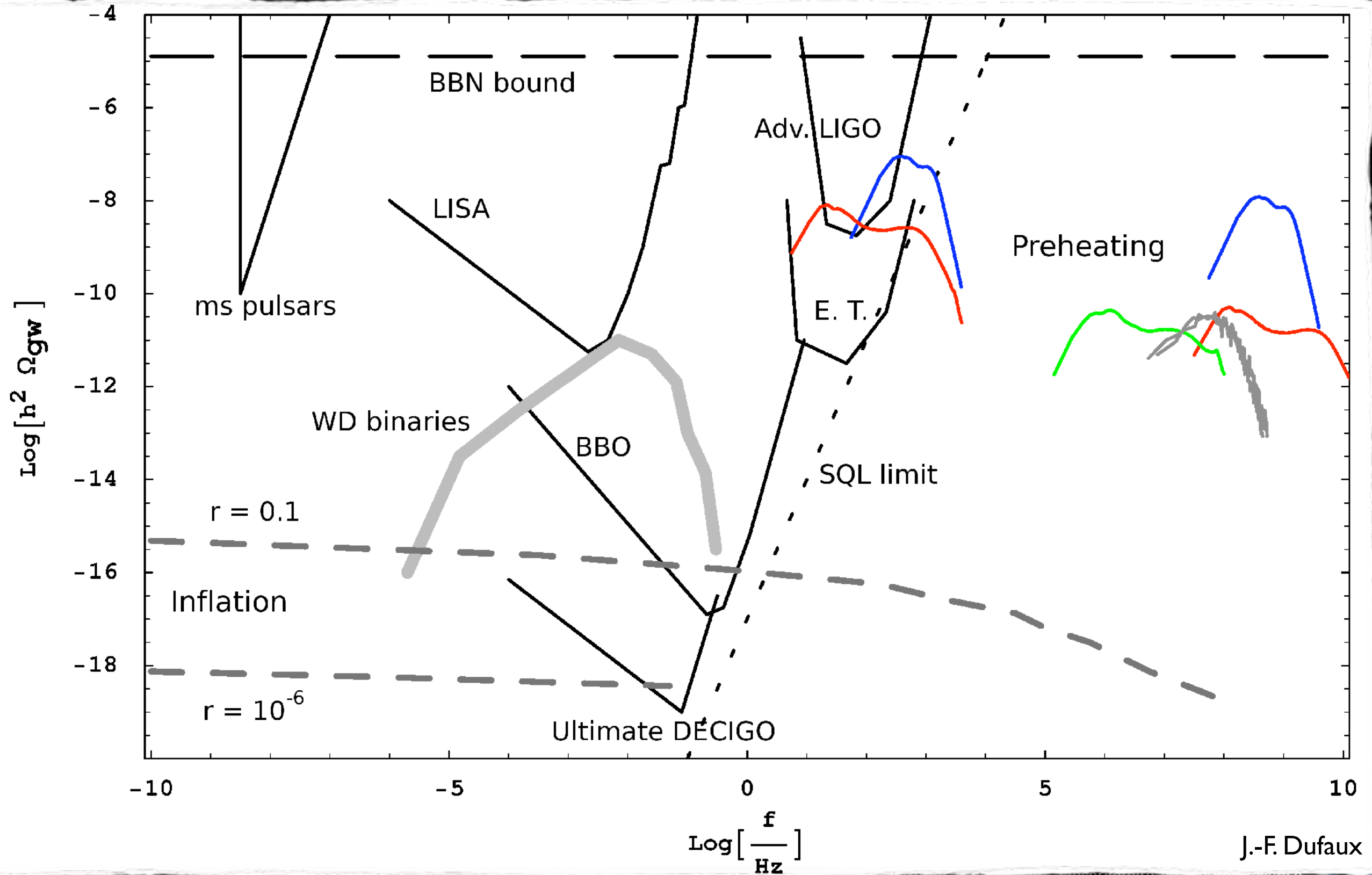
LISA (~2018)



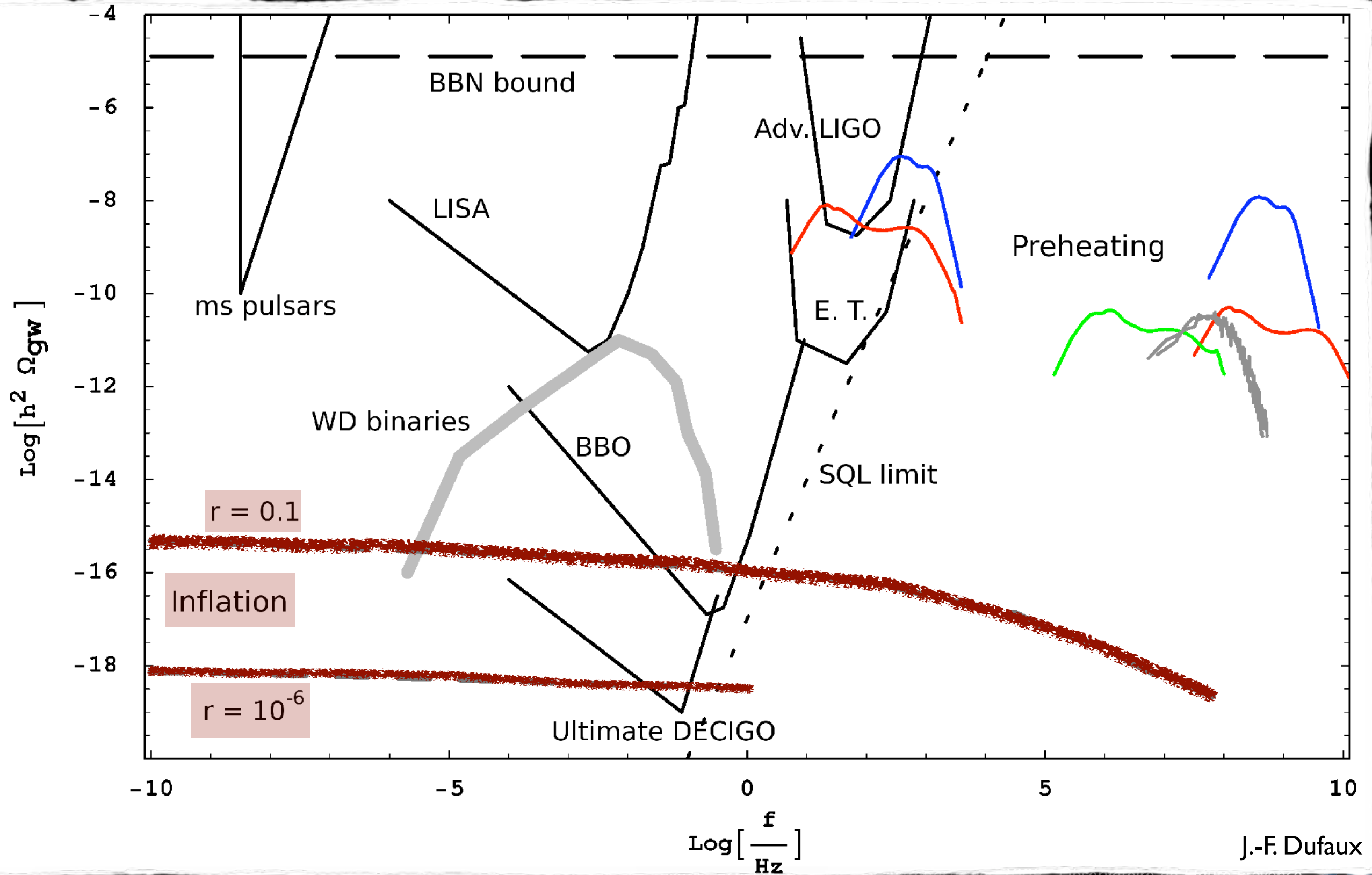
- La détection sera difficile : plus adaptés aux événements violents



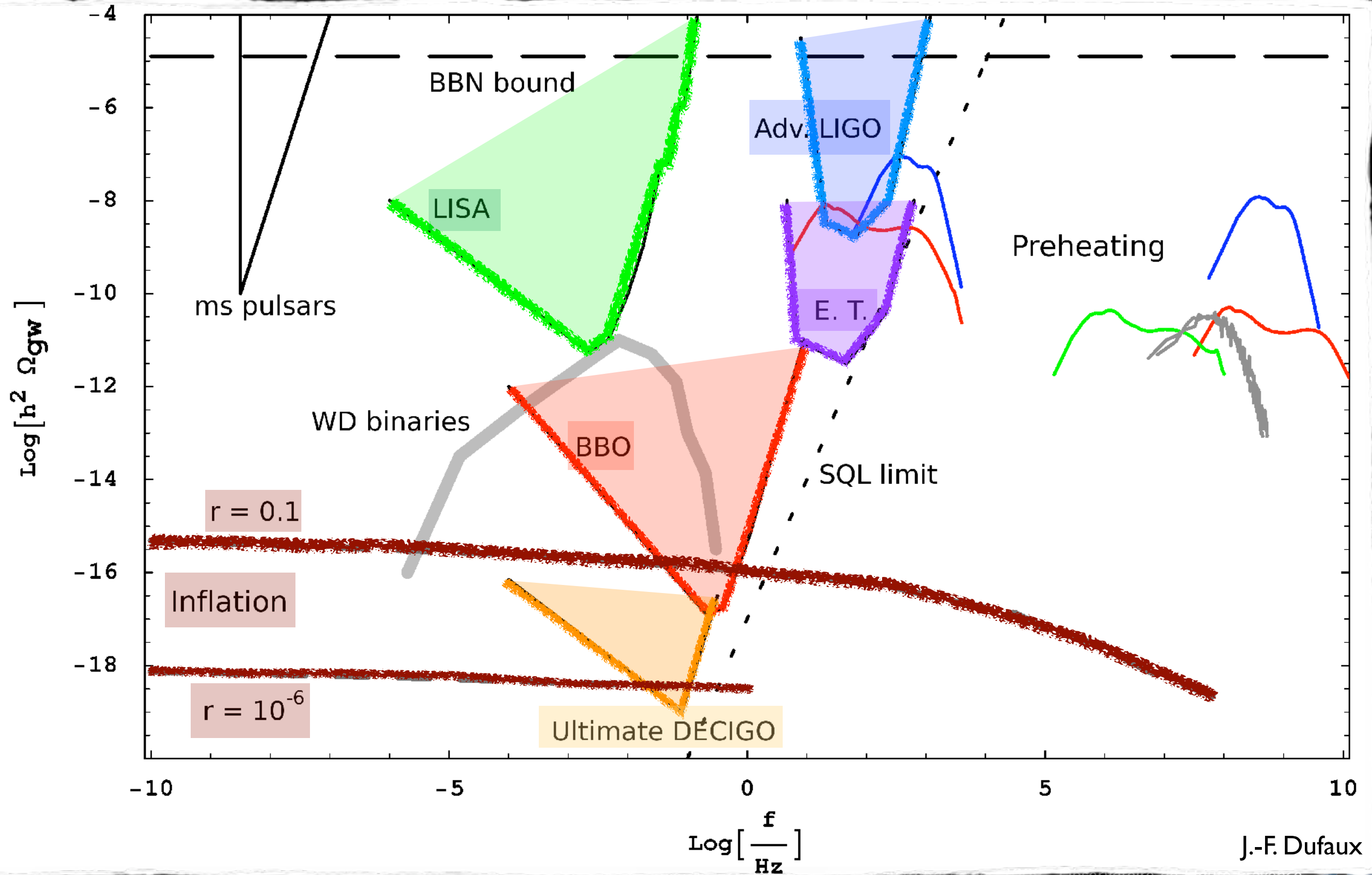
# Perspectives de détection directe



# 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:

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

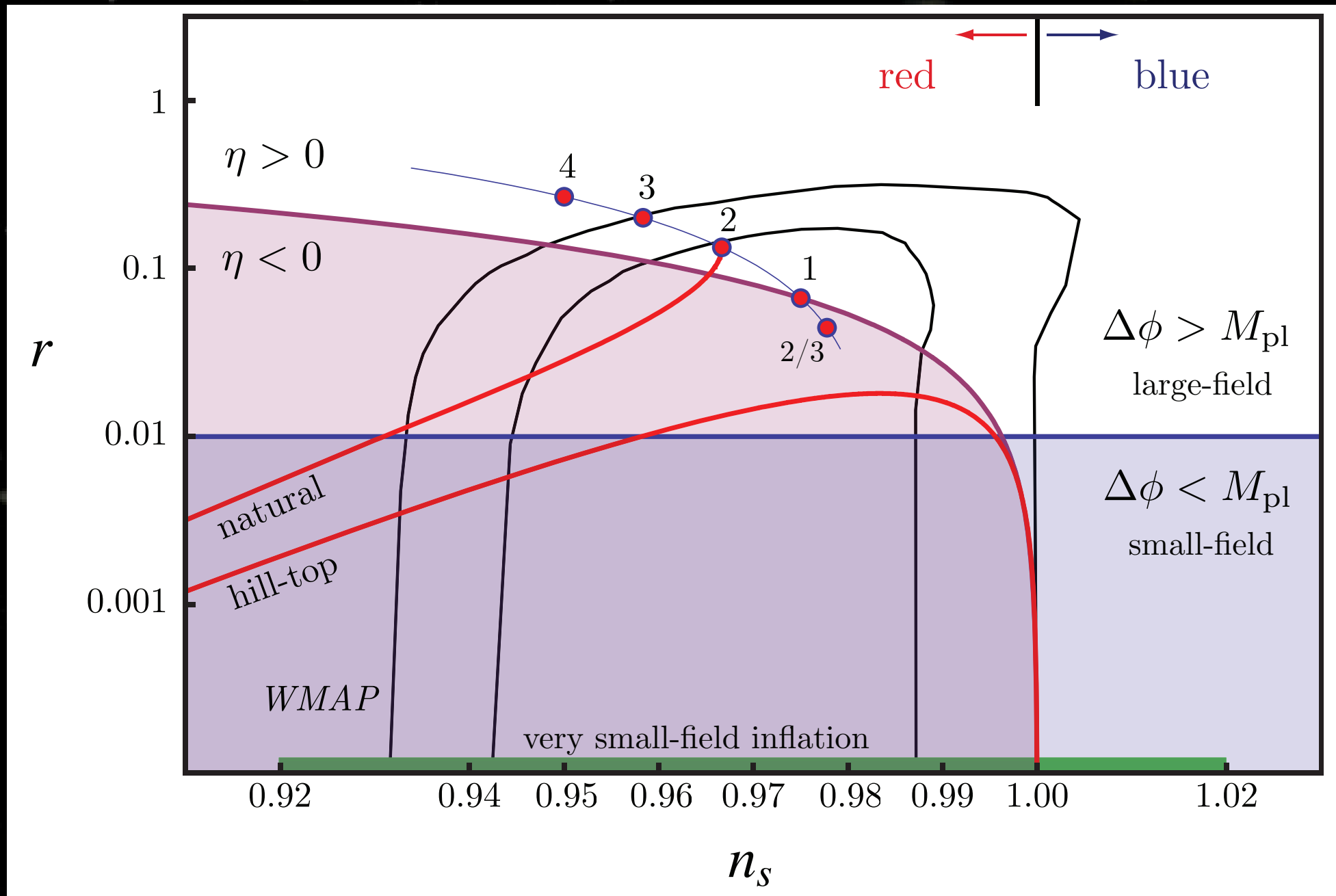
- ★  $A_s$  relié à  $V'$
- ★  $n_s$  relié à  $V''$
- ★ *running de*  $n_s$  relié à  $V'''$
- ★  $A_t$  relié à  $V$

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





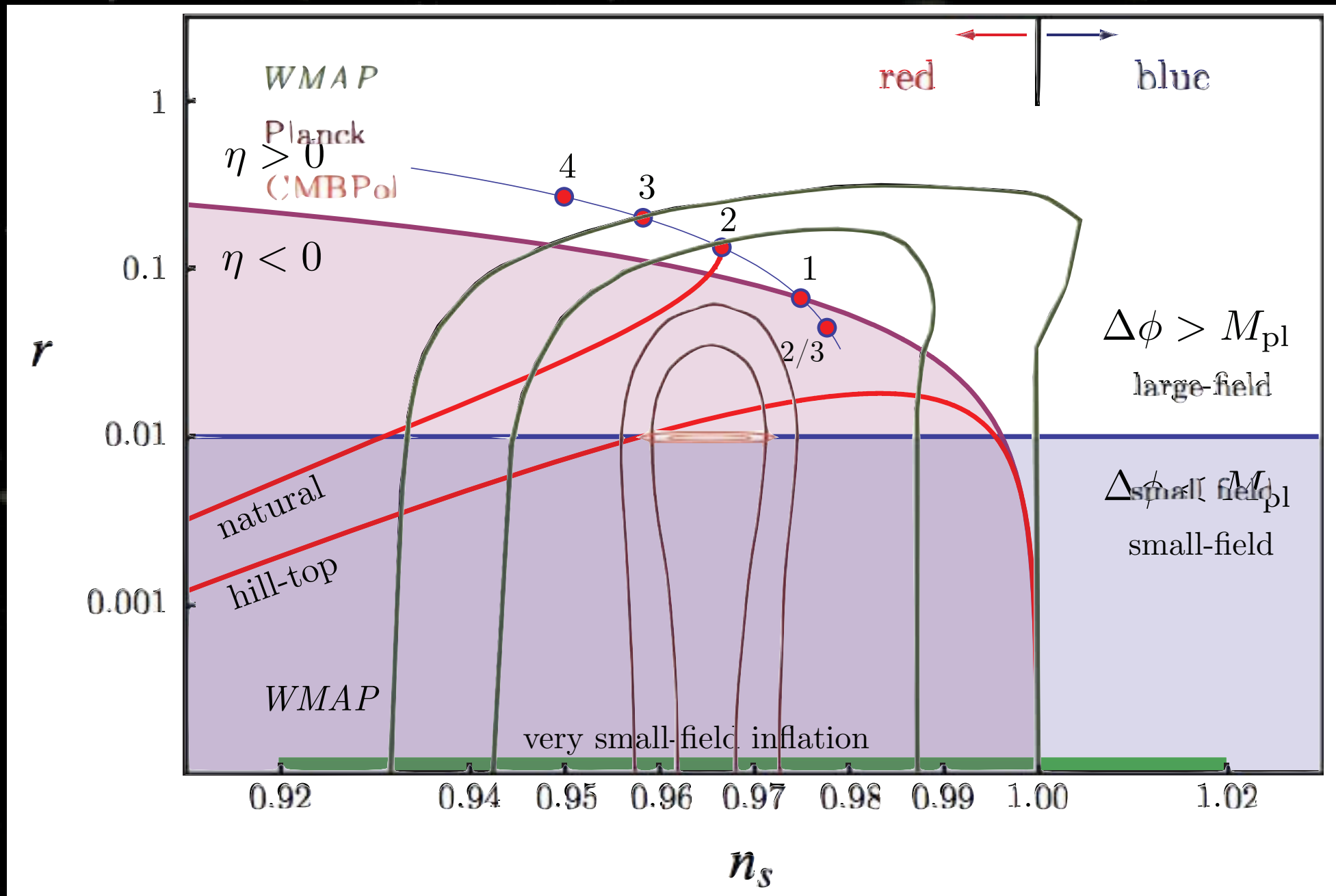
# ex: relations entre $n_s$ et $r$



CMBpol Mission Concept Study - Inflation WG report (arXiv:0811.3119)



# ex: relations entre $n_s$ et $r$



CMBpol Mission Concept Study - Inflation WG report (arXiv:0811.3119)



# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires



# Les modes B : le Graal de la cosmologie

- Ondes Gravitationnelles Primordiales :

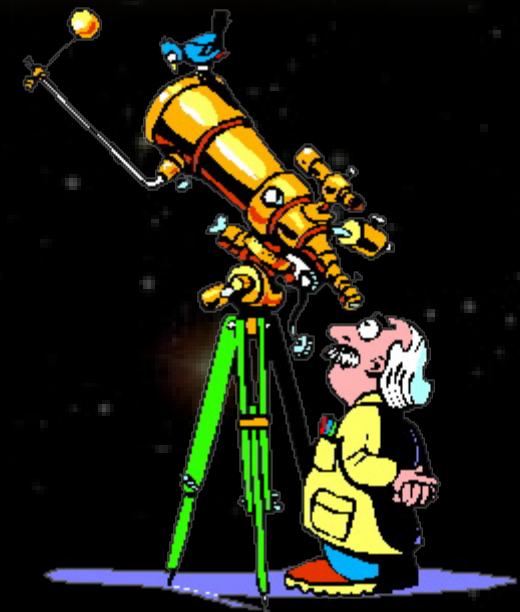
- Observation directe de l'inflation
- Amplitude des modes tenseur reliée à l'énergie de l'inflation
  - prédictions courantes :  $0.001 < r < 0.3$

- Cordes cosmiques et autres défauts ?

- Faible contribution à la formation des structures
- ... mais il devrait y en avoir «un peu» ...
- Contribution significative aux modes B
- [Bevis et al. (2007), Phys.Rev.D76:043005]
- [Urrestilla et al. (2008), astro-ph/0803.2059]
- [Pogosian et Wyman (2007), astro-ph/0711.0747]

- Supercordes ?

- la plupart (toutes ?) des théories connues de supercordes prédisent  $r \ll 1$
- Opportunité unique de falsifier les théories de cordes !
- [Kallosh & Linde (2007), JCAP 0704:017]





# Les modes B : le Graal de la cosmologie

- Ondes Gravitationnelles Primordiales :

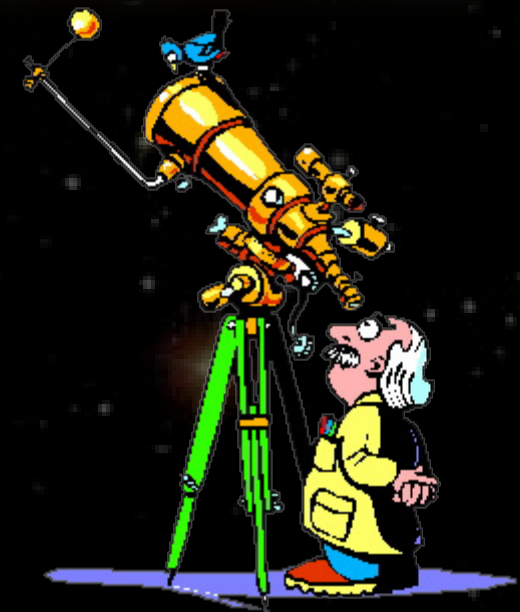
- Observation directe de l'inflation
- Amplitude des modes tenseur reliée à l'énergie de l'inflation
  - prédictions courantes :  $0.001 < r < 0.3$

- Cordes cosmiques et autres défauts ?

- Faible contribution à la formation des structures
- ... mais il devrait y en avoir «un peu» ...
- Contribution significative aux modes B
- [Bevis et al. (2007), Phys.Rev.D76:043005]
- [Urrestilla et al. (2008), astro-ph/0803.2059]
- [Pogosian et Wyman (2007), astro-ph/0711.0747]

- Supercordes ?

- la plupart (toutes ?) des théories connues de supercordes prédisent  $r \ll 1$
- Opportunité unique de falsifier les théories de cordes !
- [Kallosh & Linde (2007), JCAP 0704:017]



# Difficultés attendues dans la quête...

- Sensibilité :

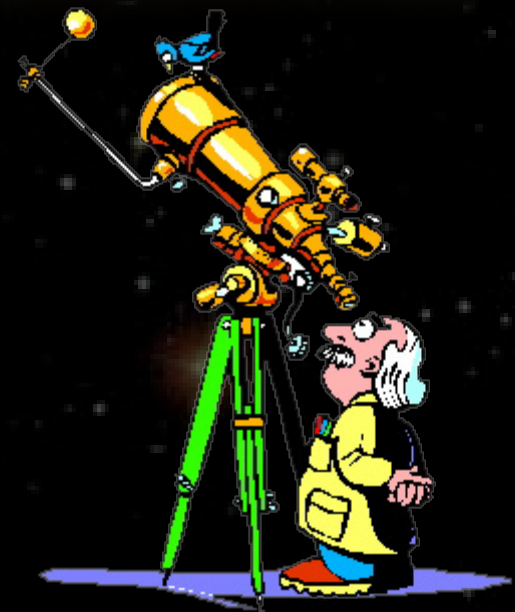
- La polarisation B est au mieux 10x plus faible que E
- L'amplitude pourrait être **très** basse ...
- 1 année de Planck, c'est  $S/N=1$  pour  $T/S=0.01$
- Une mission spatiale n'est pas pour demain ...

- Avant-plans :

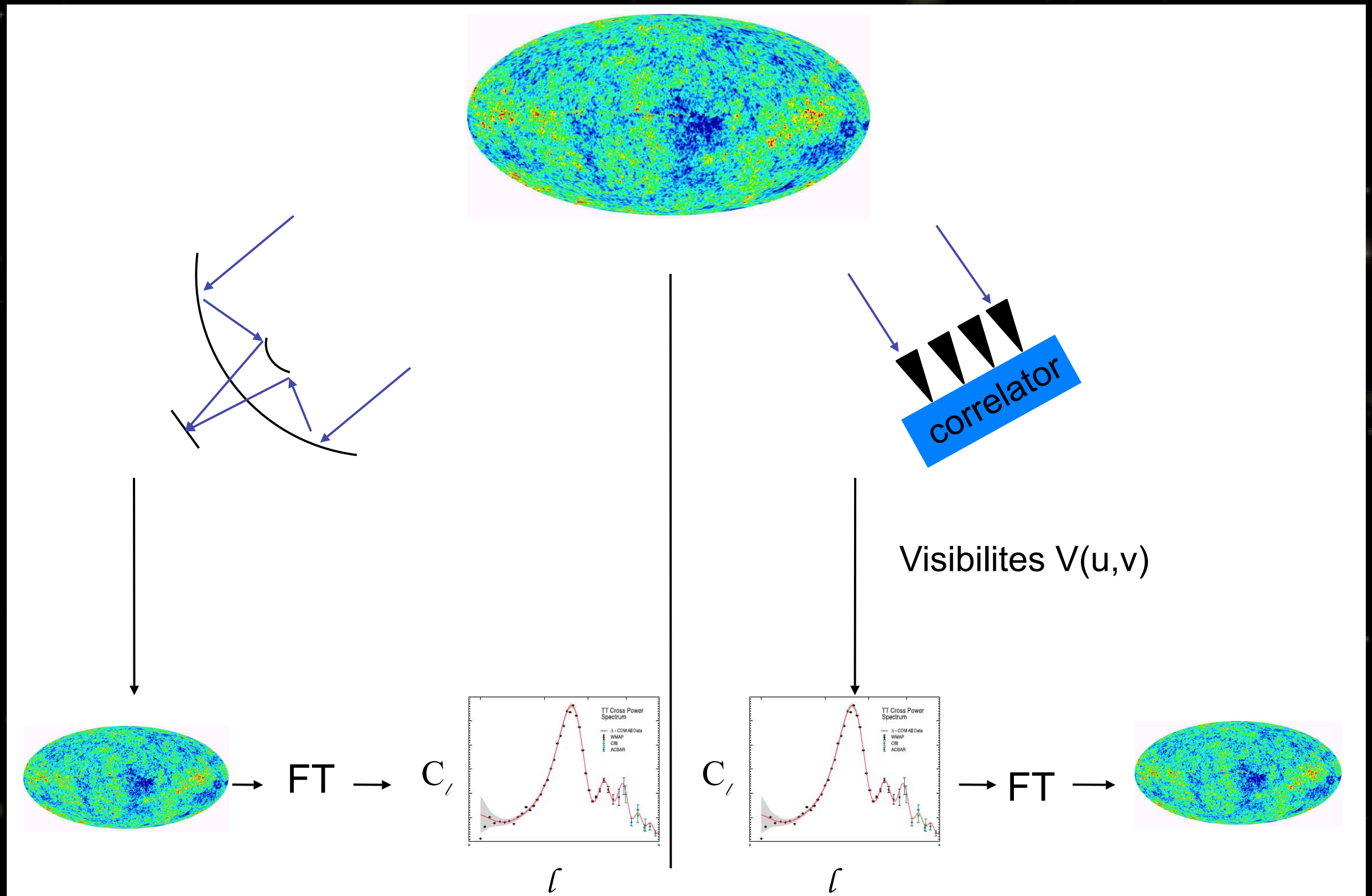
- Nécessité de les soustraire avec précision
  - ➔ Détecteur multi-longueur d'onde
- Observer un région ultra-propre
  - ➔ Ne peut pas être trop petite car les modes B primordiaux sont aux grandes échelles

- 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 ...



# Imageurs et interféromètres



[From P. Timbie]





# 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  $\sim 15$  voies (DASI, CBI)

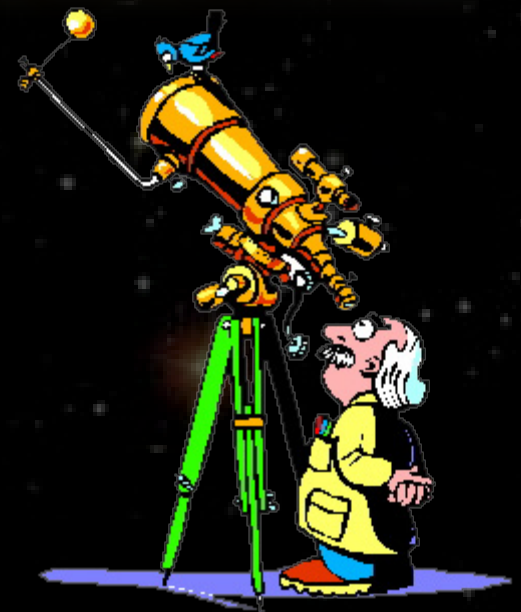


Première détection de la polarisation du CMB !



# Projets expérimentaux de recherche des modes B

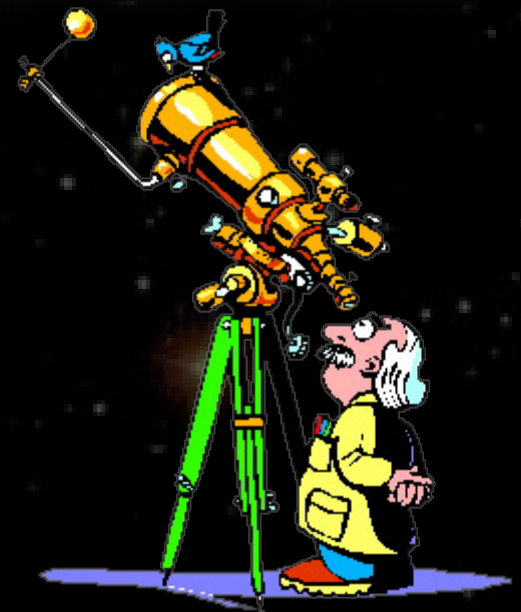
- Planck ! (2009)
  - ★ Détection possible de  $r=0.03$  à 95% C.L. (28 mois)
  - ★ Ciel complet  $\Rightarrow$  pic de réionisation ( $\ell=7$ )
- Au sol et en ballon (2009-2012)
  - $\rightarrow$  (USA - Europe)
  - ★ Imageurs : BICEP, EBEX, SPIDER, QUIET, CLOVER
  - ★ Interféromètres hétérodynes: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



NB: il n'y a QUE des imageurs ... à part QUBIC

# 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)
  - $\rightarrow$  (USA - Europe)
  - ★ Imageurs : BICEP, EBEX, SPIDER, QUIET, ~~CLOVER~~
  - ★ Interféromètres hétérodynes:  $\emptyset$
  - ★ Interféromètres bolométriques: QUBIC
- Futurs projets satellites ( $\sim$  longtemps)
  - ★ CMBPol
  - ★ BPOL



NB: il n'y a QUE des imageurs ... à part QUBIC

# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires





# Imageurs

- **Télescope «classique» :**

- ★ deux miroirs (résolution angulaire :  $1.22 \frac{\lambda}{D} \simeq 6 \text{ arcmin} \times \frac{\lambda}{3 \text{ mm}} \frac{1 \text{ m}}{D}$  )
- ★ On peut remplacer les miroirs par des lentilles (ex: BICEP)
- ★ Plan focal :
  - Filtres
  - Cornets
  - Matrice de bolomètres (nécessite une cryogénie active :  $\sim 0.1\text{-}0.3 \text{ K}$ )

- **La stratégie de scan est cruciale**

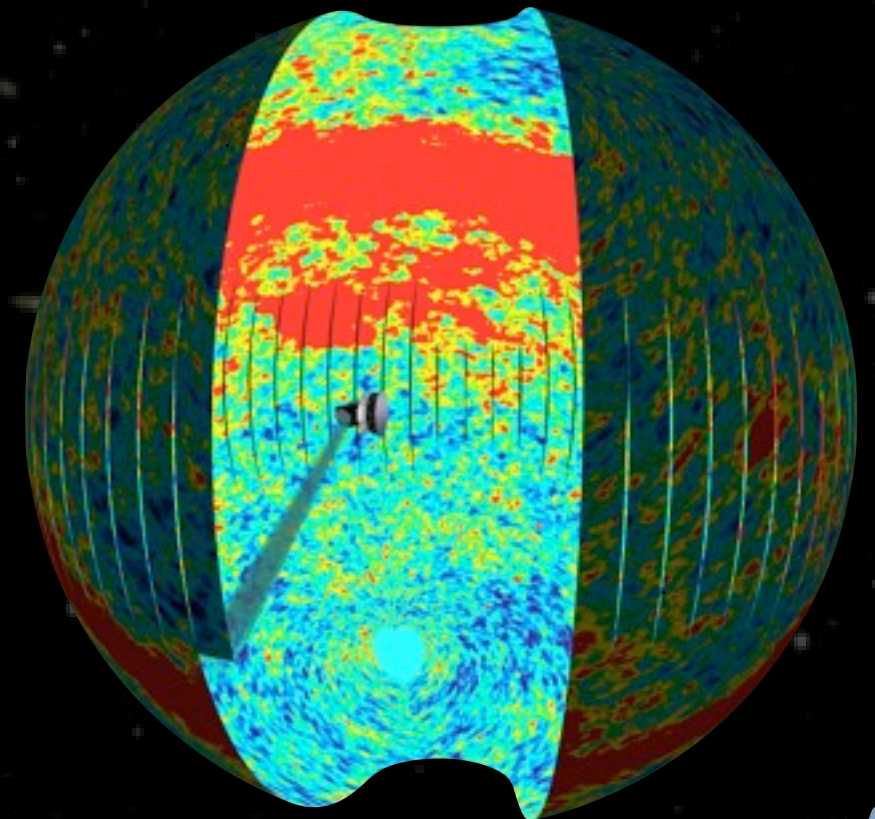
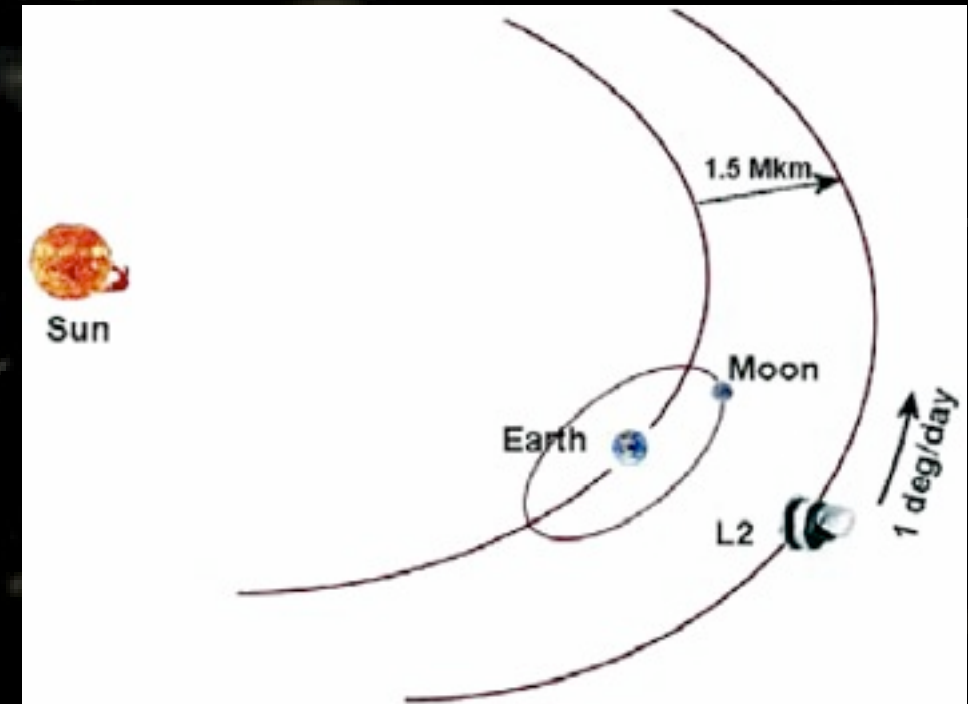
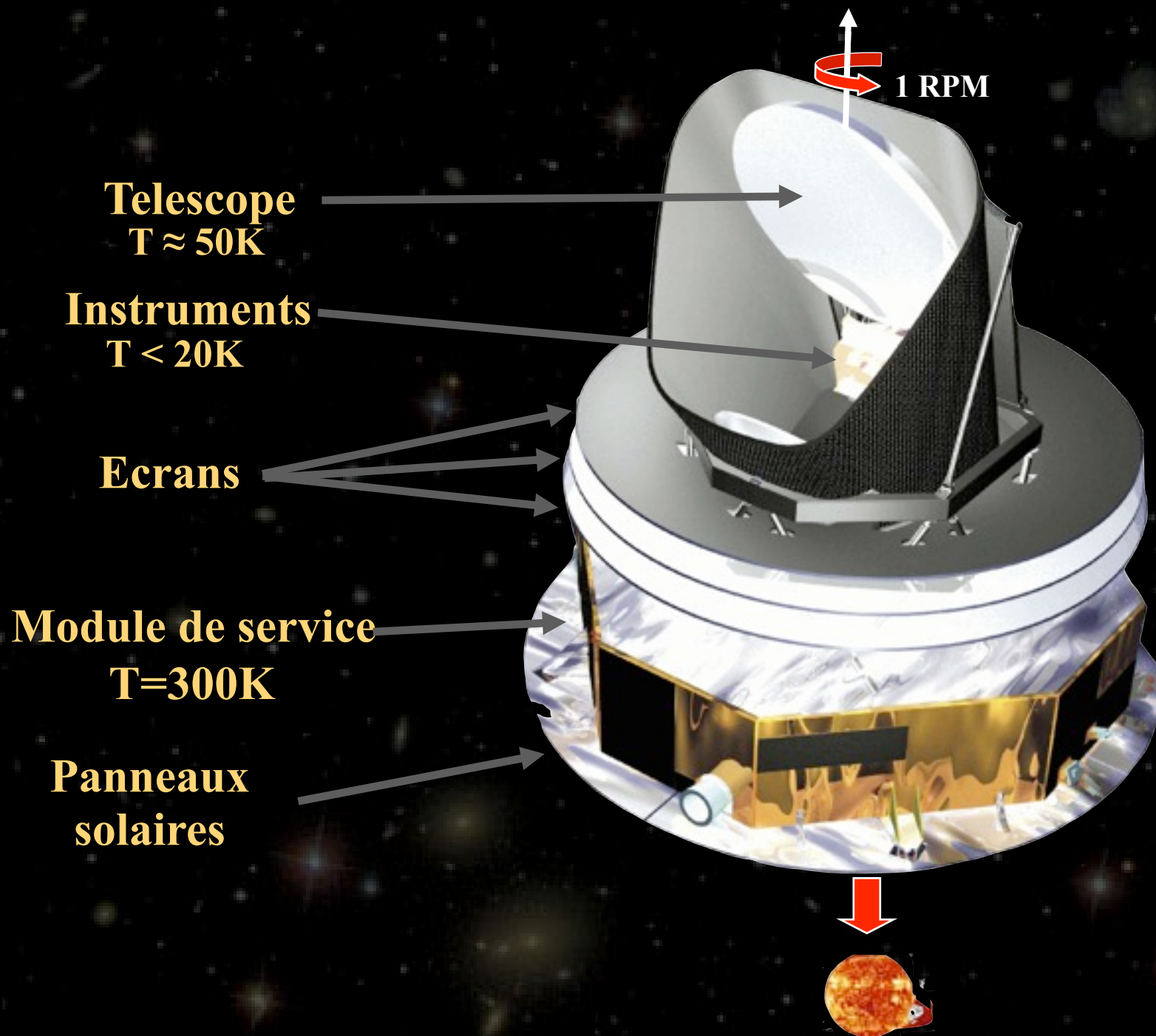
- ★ Le champ de vue parcourt le ciel et forme une «timeline»
- ★ Les cartes sont produites au cours de l'analyse de données (complexe)

- **Les spectres de puissance sont extraits à partir des cartes**

- ★ Beaucoup de techniques : Basées sur des MC ou des maximum de vraisemblance
- ★ C'est aussi un problème complexe

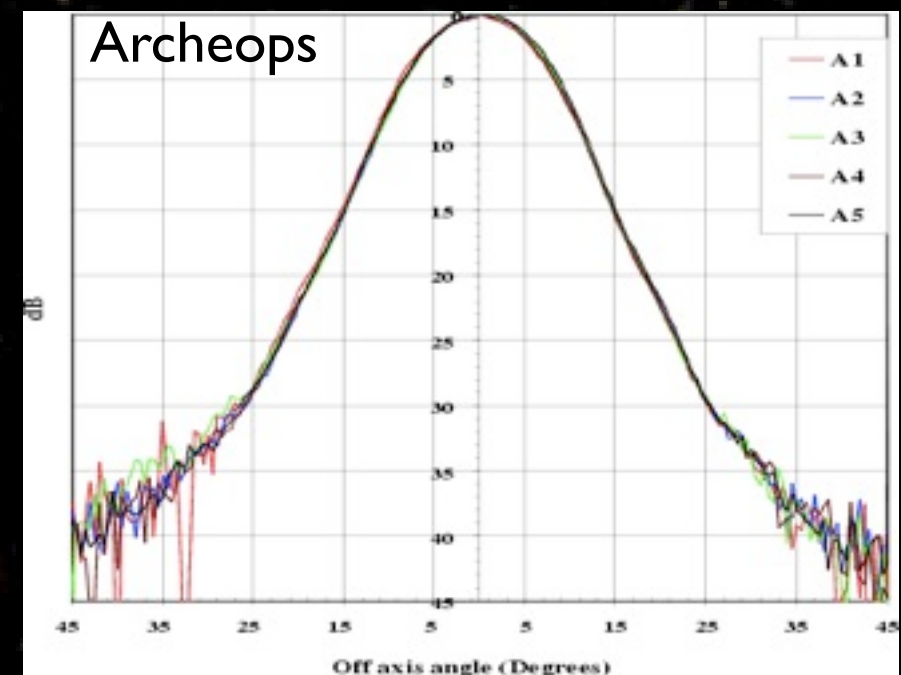
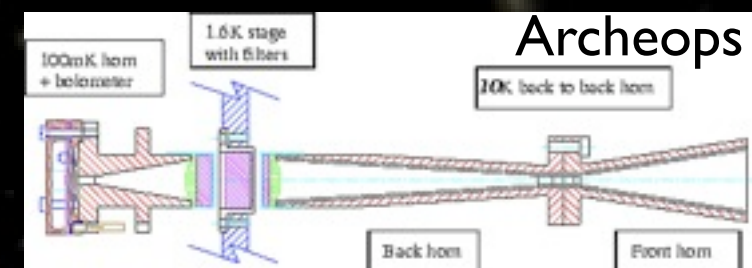


# Le satellite Planck



# Plan focal : cornets

- Les cornets «guident» l'onde E.M. vers les détecteurs
- Ils comprennent des filtres
- Ils forment le «lobe» (réponse angulaire - PSF)
- Les cornets «corrugué» ont de faibles lobes secondaires et un lobe principal Gaussien
- Refroidis à  $\sim 4-10$  K (afin de réduire leur rayonnement)





# Plan focal : bolomètres

- Nécessite une cryogénie active (0.1-0.3 K)

- ★ énorme contrainte instrumentale ...

- En forme de toile d'araignée pour optimiser le couplage au ciel

- Sensibles à la polarisation

- ★ important pour les effets systématiques

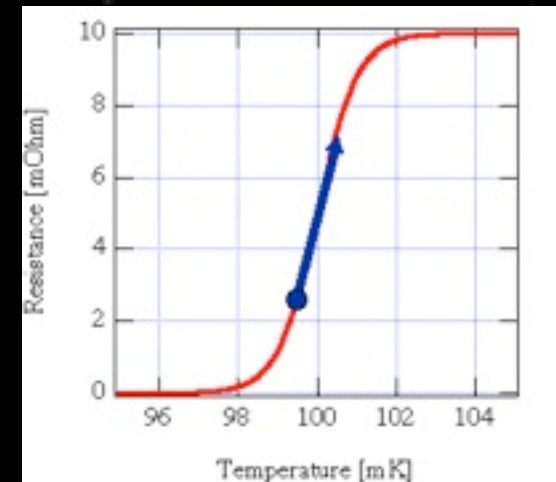
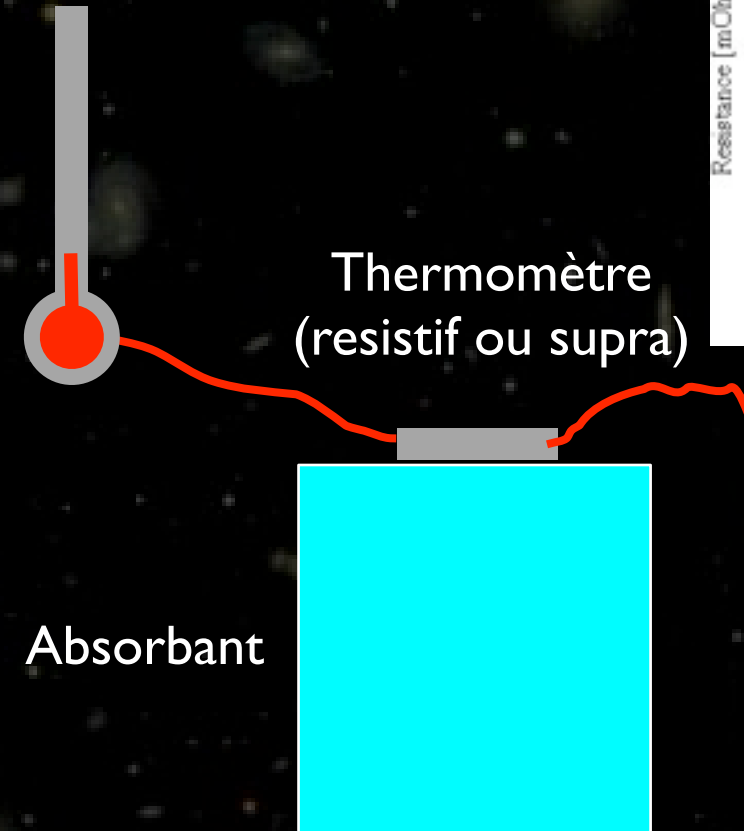
- Rapides (TES ~ msec)

- ★ Important pour la résolution angulaire

- Limités par le bruit de photons

- ★ Détecteurs ultimes : le bruit est seulement le bruit de photons

- ★ L'amélioration de la sensibilité ne peut provenir que par leur multiplication





# Plan focal : bolomètres

- Nécessite une cryogénie active (0.1-0.3 K)

- ★ énorme contrainte instrumentale ...

- En forme de toile d'araignée pour optimiser le couplage au ciel

- Sensibles à la polarisation

- ★ important pour les effets systématiques

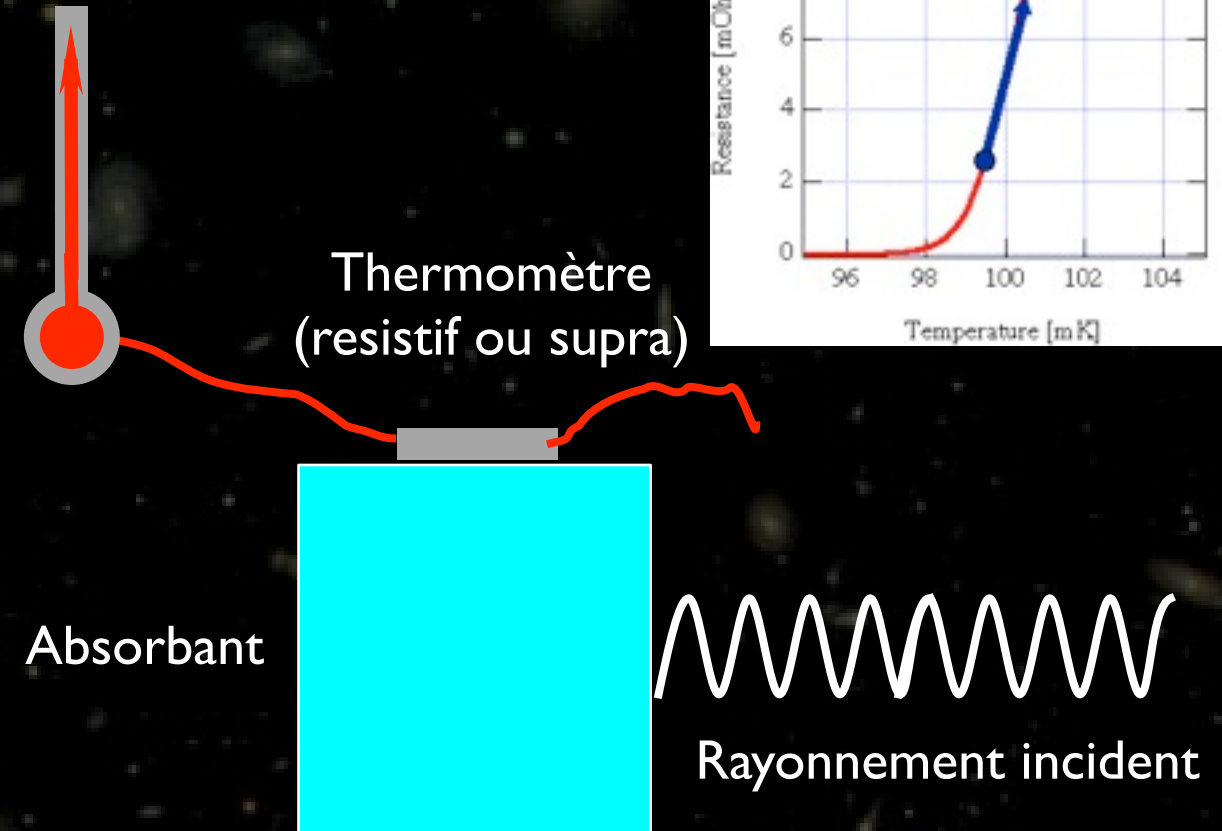
- Rapides (TES ~ msec)

- ★ Important pour la résolution angulaire

- Limités par le bruit de photons

- ★ Détecteurs ultimes : le bruit est seulement le bruit de photons

- ★ L'amélioration de la sensibilité ne peut provenir que par leur multiplication



# Plan focal : bolomètres

- Nécessite une cryogénie active (0.1-0.3 K)

- ★ énorme contrainte instrumentale ...

- En forme de toile d'araignée pour optimiser le couplage au ciel

- Sensibles à la polarisation

- ★ important pour les effets systématiques

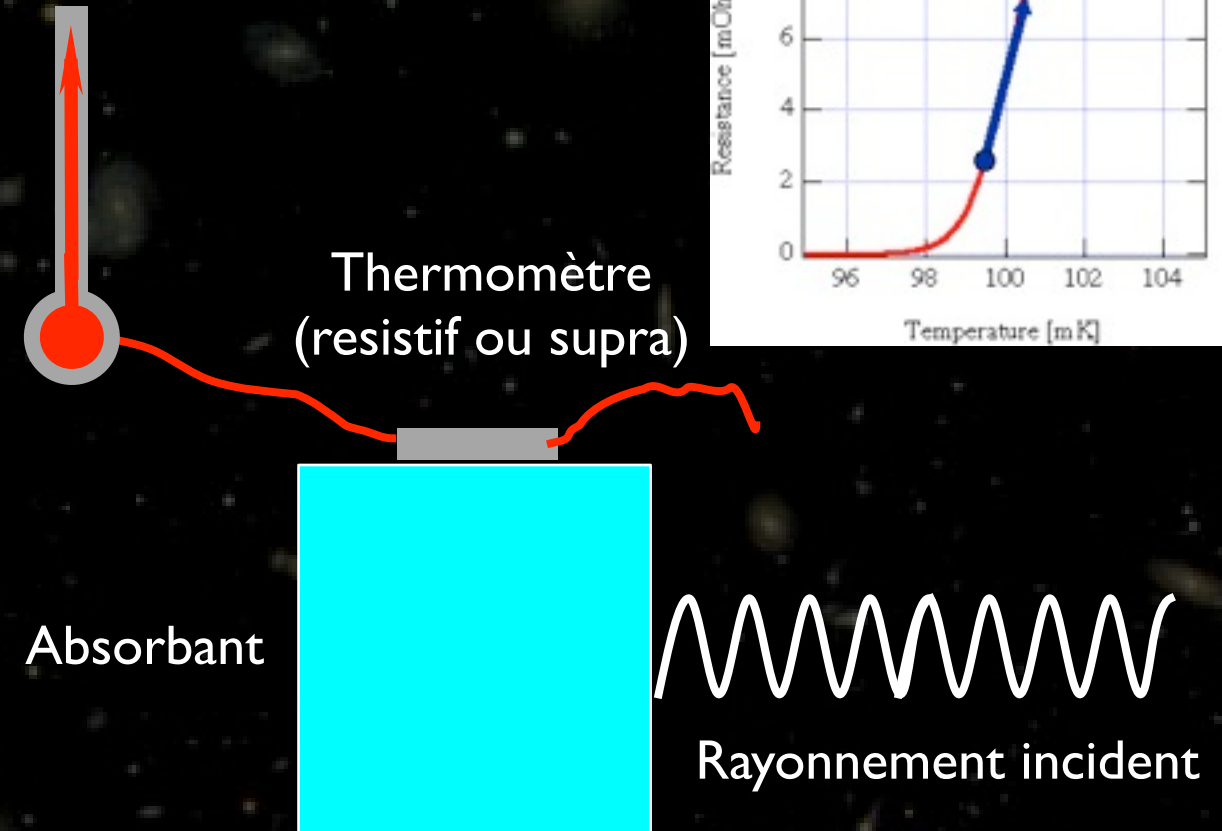
- Rapides (TES ~ msec)

- ★ Important pour la résolution angulaire

- Limités par le bruit de photons

- ★ Détecteurs ultimes : le bruit est seulement le bruit de photons

- ★ L'amélioration de la sensibilité ne peut provenir que par leur multiplication



# Plan focal : bolomètres

- Nécessite une cryogénie active (0.1-0.3 K)

- ★ énorme contrainte instrumentale ...

- En forme de toile d'araignée pour optimiser le couplage au ciel

- Sensibles à la polarisation

- ★ important pour les effets systématiques

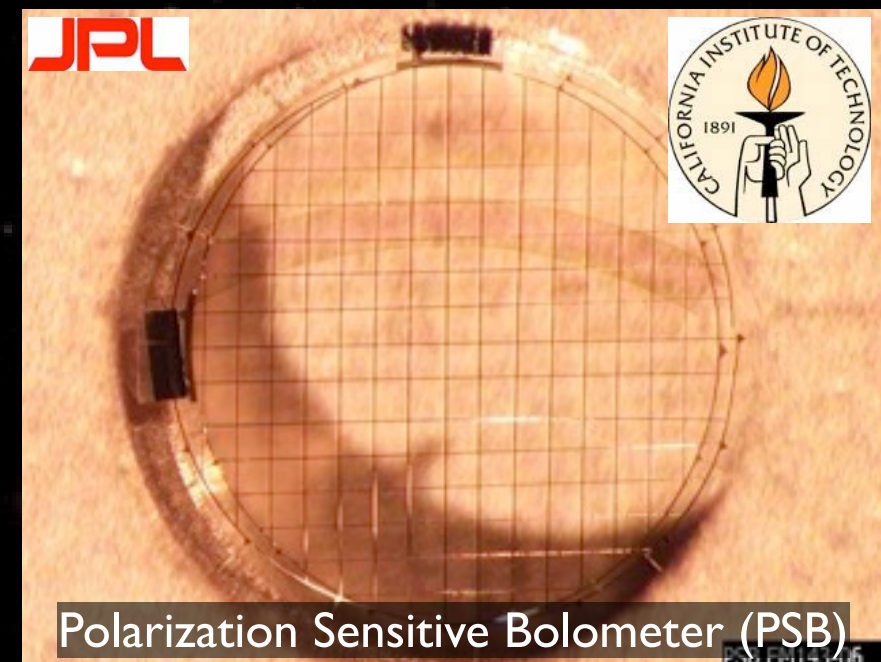
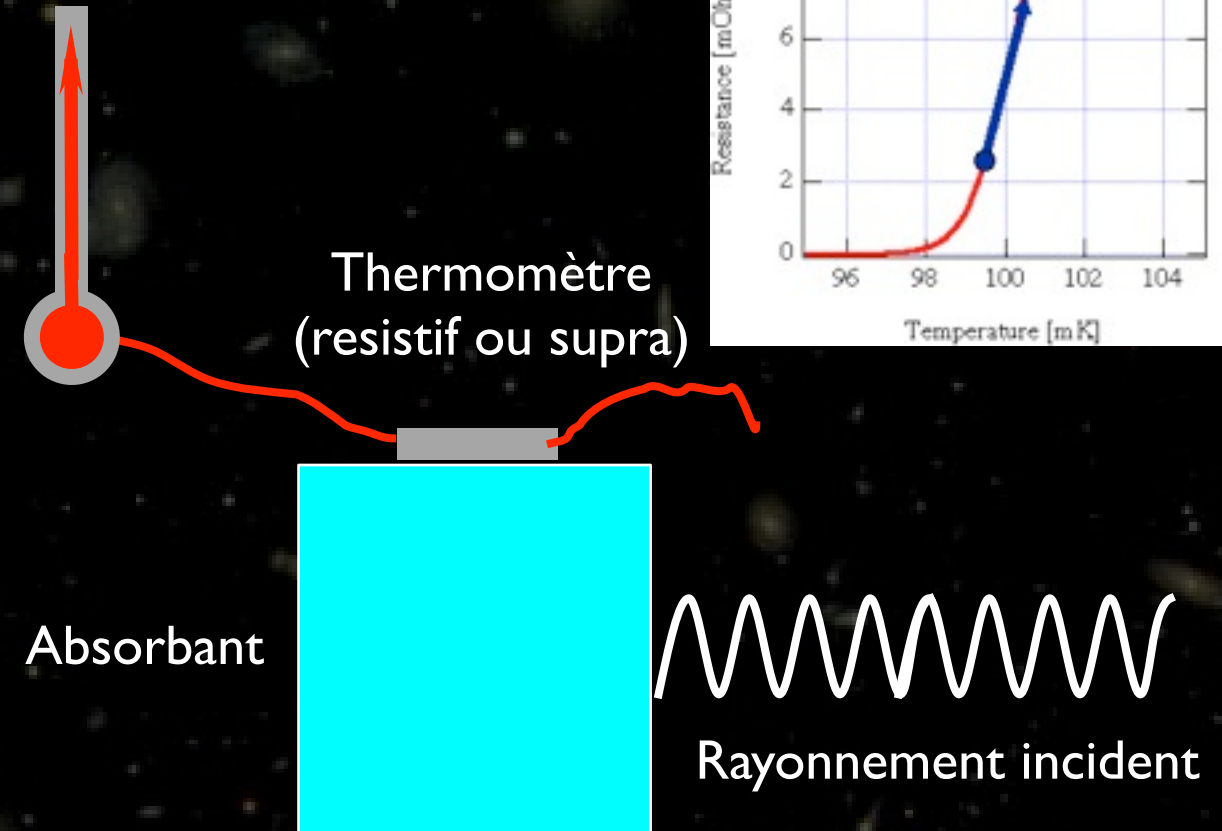
- Rapides (TES ~ msec)

- ★ Important pour la résolution angulaire

- Limités par le bruit de photons

- ★ Détecteurs ultimes : le bruit est seulement le bruit de photons

- ★ L'amélioration de la sensibilité ne peut provenir que par leur multiplication

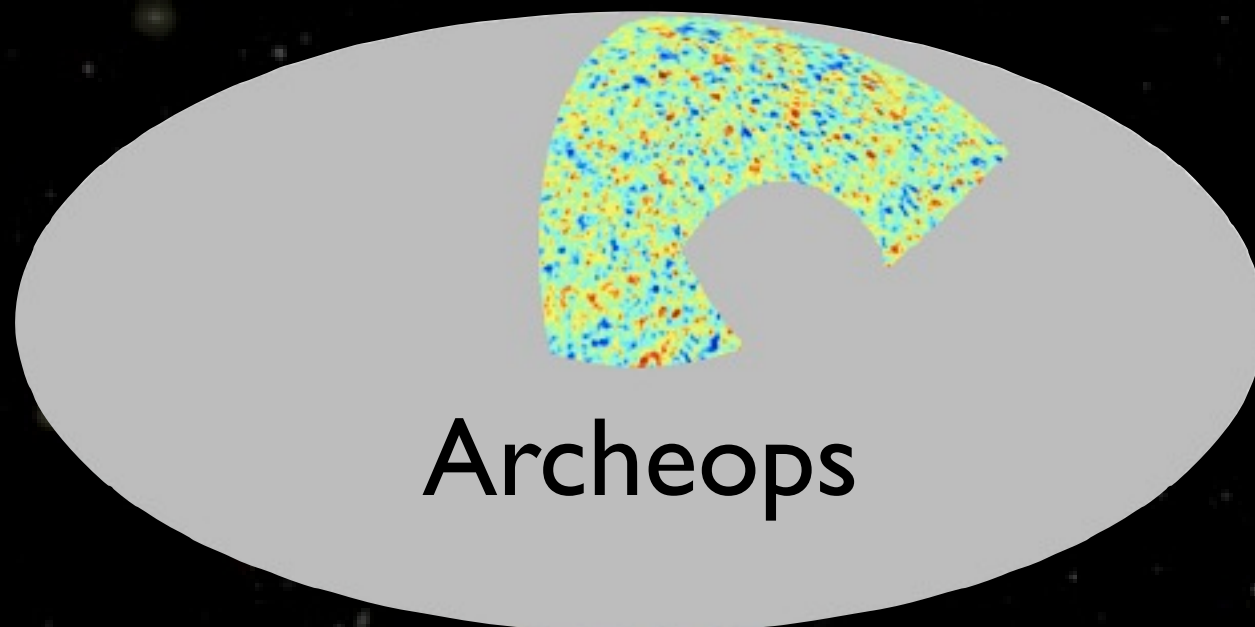
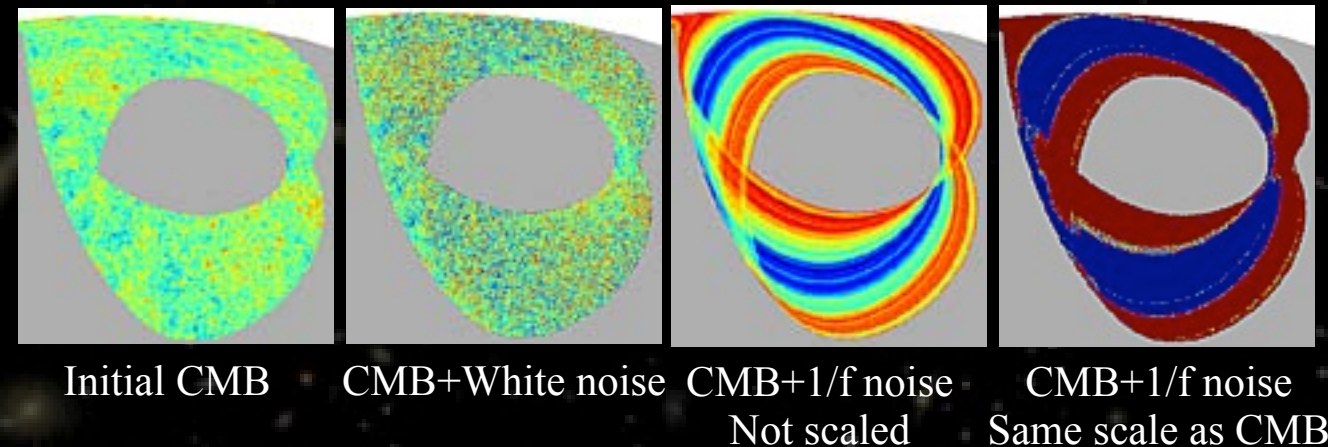
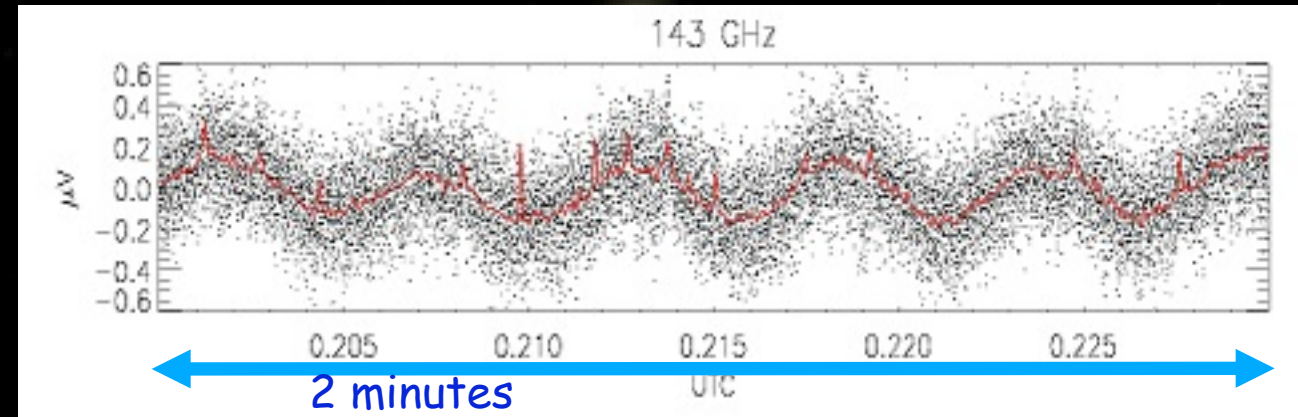




# Fabrication de cartes

revue : JCH astro-ph/0310787 - CRAS

- Les «Timelines» sont projetées sur le ciel
- Il faut tenir compte du bruit en  $1/f$ 
  - ★ «Map Making» optimal
  - ★ Destriage





# Spectre de Puissance

revue : JCH astro-ph/0310787 - CRAS

- Carte :

$$\vec{T} = \vec{s} + \vec{n}$$

- Partie signal :

$$s_p = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} B_{\ell} Y_{\ell m}(\theta_p, \phi_p)$$

$$\langle a_{\ell m} a_{\ell' m'}^* \rangle = C_{\ell} \delta_{\ell \ell'} \delta_{m m'}$$

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$$

- Matrice de covariance de la carte :

$$\begin{aligned} M &= \langle \vec{T} \cdot \vec{T}^t \rangle = \langle \vec{s} \cdot \vec{s}^t \rangle + \langle \vec{n} \cdot \vec{n}^t \rangle \\ &= S + N \end{aligned}$$

où  $S_{pp'} = \langle s_p s_{p'} \rangle = \sum_{\ell} \frac{2\ell + 1}{4\pi} C_{\ell} B_{\ell}^2 P_{\ell}(\chi_{pp'})$

finalement  $M_{pp'} = N_{pp'} + \sum_{\ell} \frac{2\ell + 1}{4\pi} C_{\ell} B_{\ell}^2 P_{\ell}(\chi_{pp'})$



# Spectre de puissance

- Maximum de vraisemblance «brutal»

Bond, Jaffe & Knox, 1998  
Tegmark, 1997  
Borril, 1999

$$P(C_\ell|\vec{T}) = P(\vec{T}|C_\ell) = (2\pi)^{-N_p/2} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left[ \left( \vec{T}^t \cdot M^{-1} \cdot \vec{T} \right) + \text{Tr}(\ln M) \right] \right]$$

Erreurs statistique : Matrice de Fisher

- Pseudo-spectre de puissance

$$\tilde{C}_\ell = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |\tilde{a}_{\ell m}|^2$$

$$\tilde{C}_\ell = \sum_{\ell'} \mathcal{M}_{\ell\ell'} B_{\ell'}^2 F_{\ell'} C_{\ell'} + \tilde{N}_{\ell'}$$

Hivon et al., 2001  
Szapudi et al., 2001  
Amblard & JCH 2003

Erreurs statistiques : Monte-Carlo

- Spectre de puissance croisé

$$\tilde{C}_\ell^{i,j} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \tilde{a}_{\ell m}^i \tilde{a}_{\ell m}^{j*} \quad \text{pour les canaux } i \text{ et } j$$

Hinshaw et al, 2003  
Tristram et al. 2004

Erreurs statistiques : Analytiques / Monte-Carlo





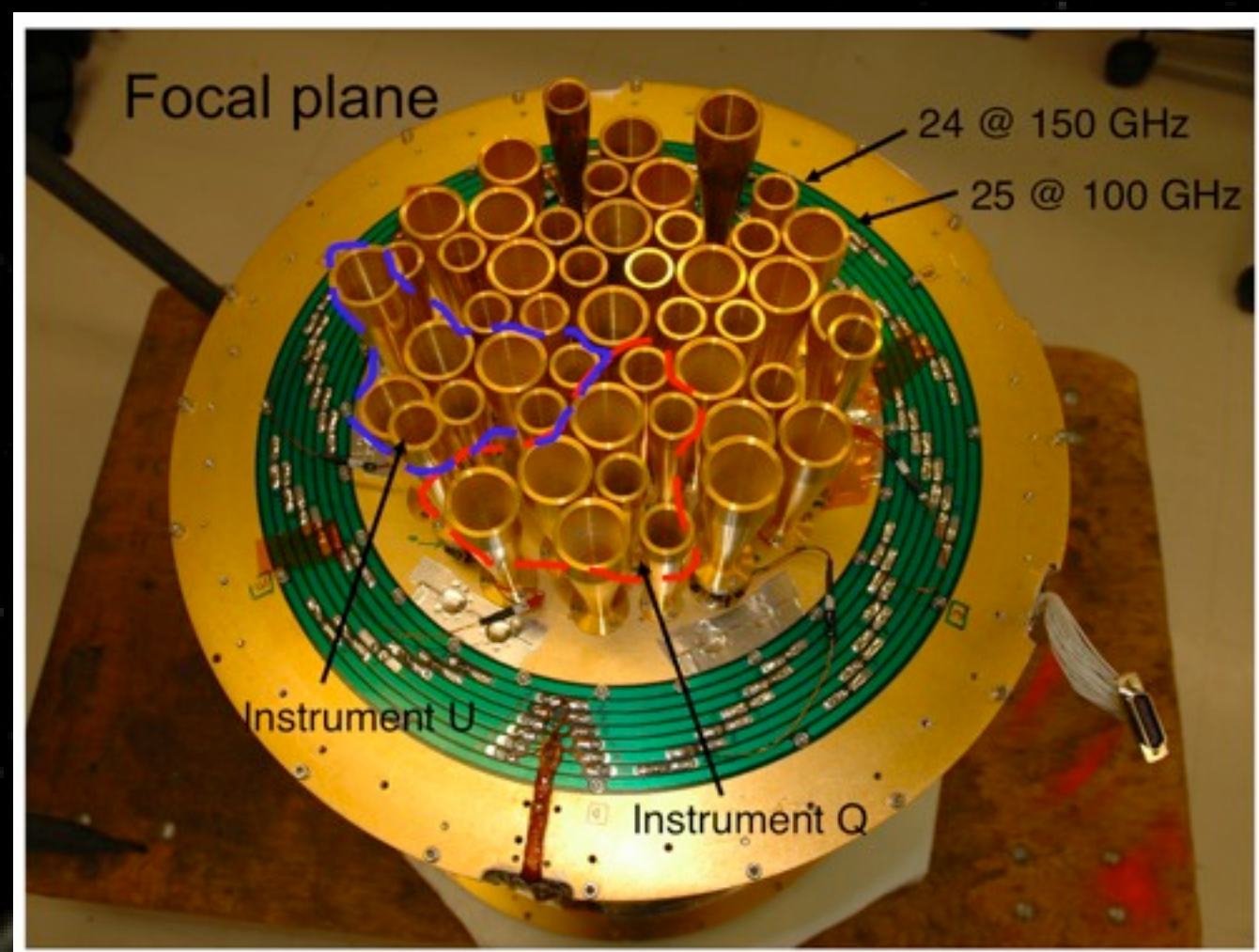


# BICEP

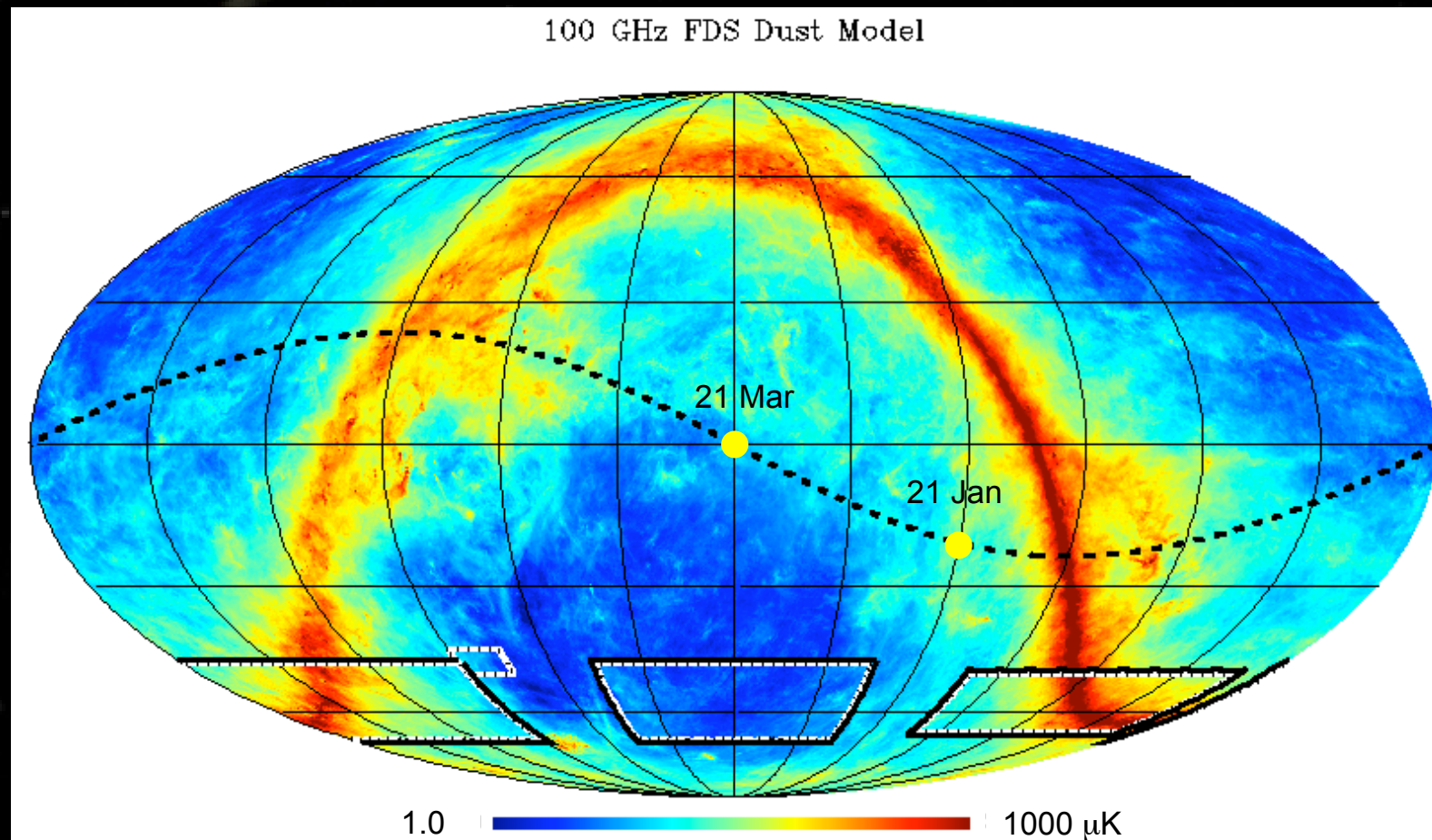
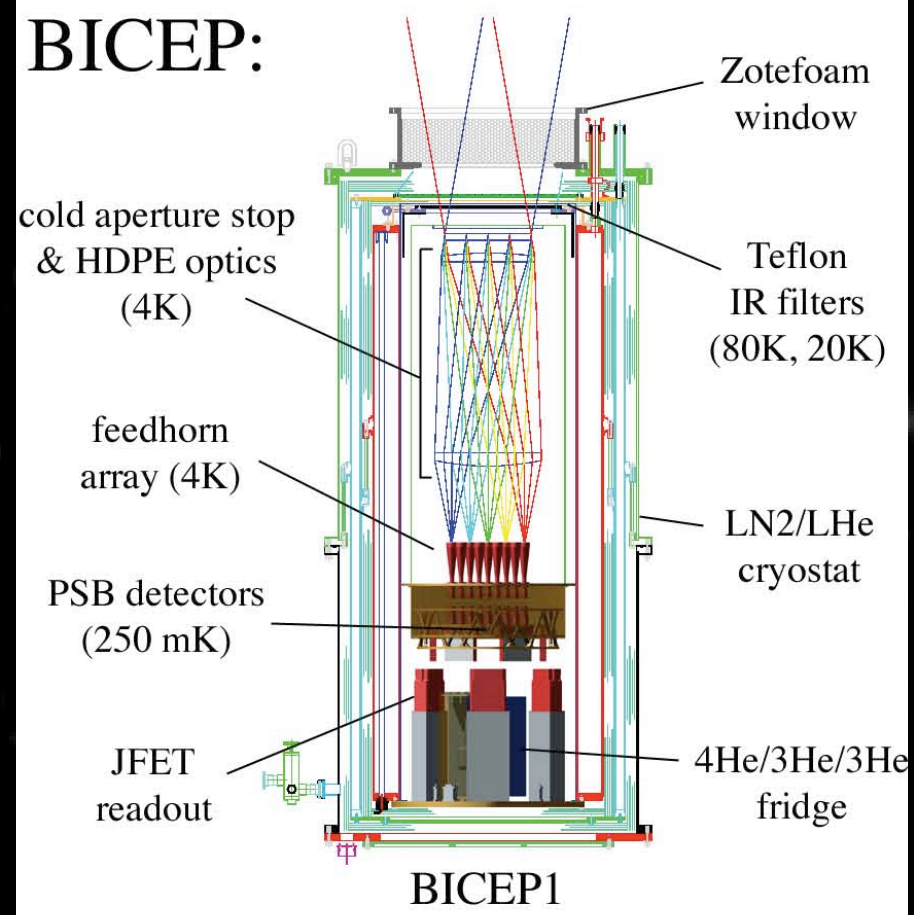
Caltech / Cardiff / JPL / Stanford  
UCB / UCSD

**Goal:  $\sim 80$  B-mode limit**

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



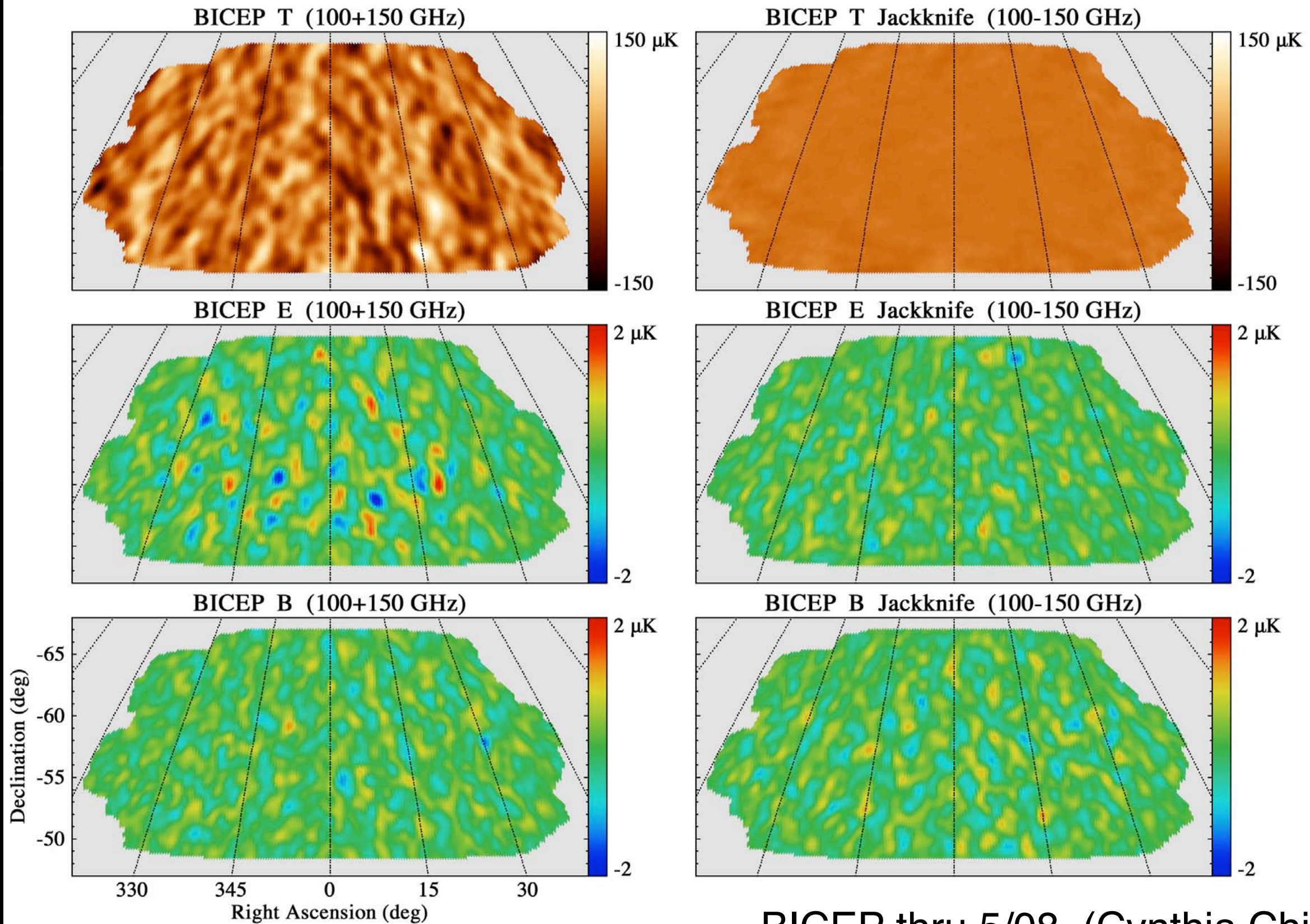
## BICEP:





# BICEP

(A. Lange)

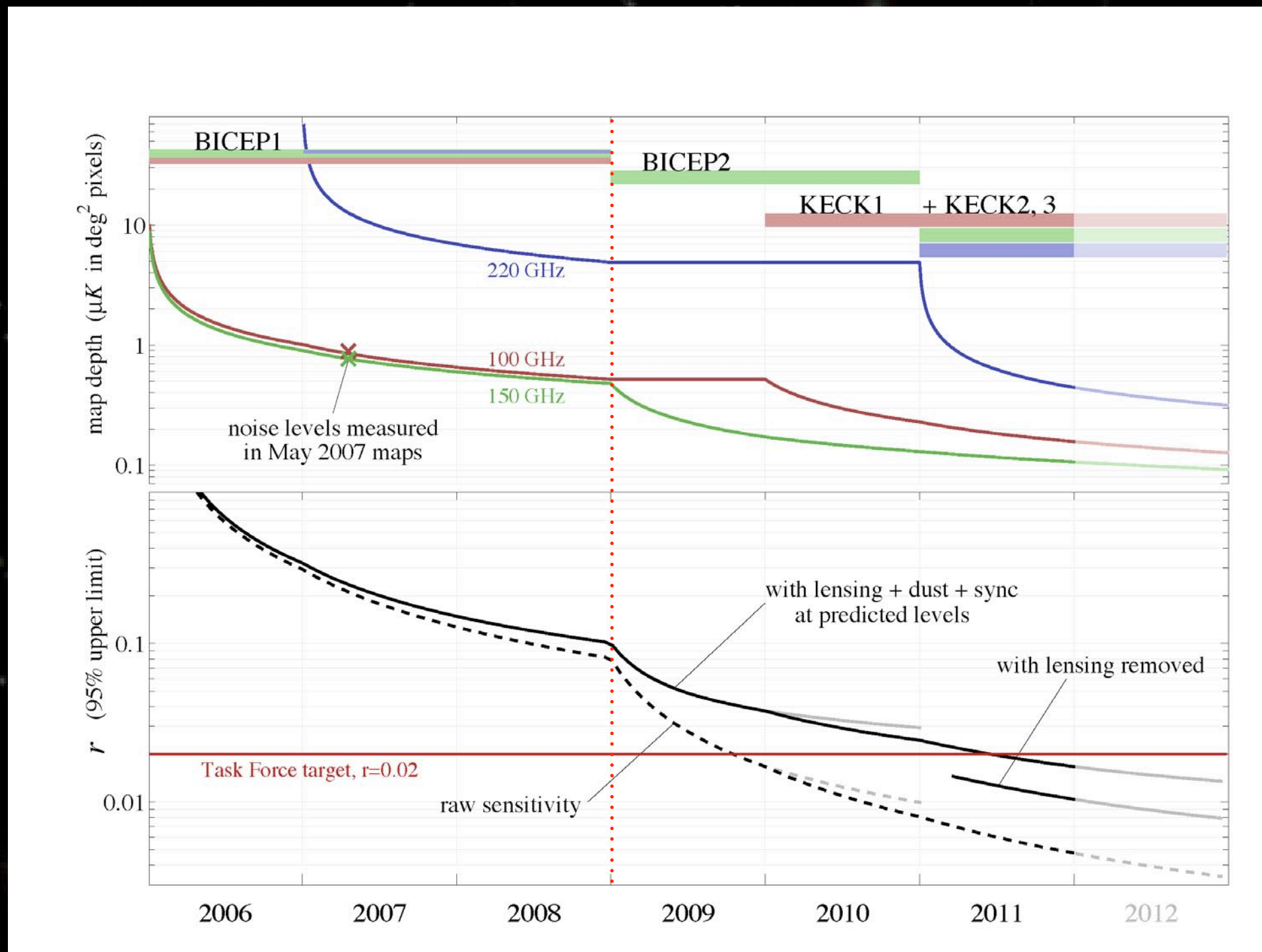


BICEP thru 5/08 (Cynthia Chiang)





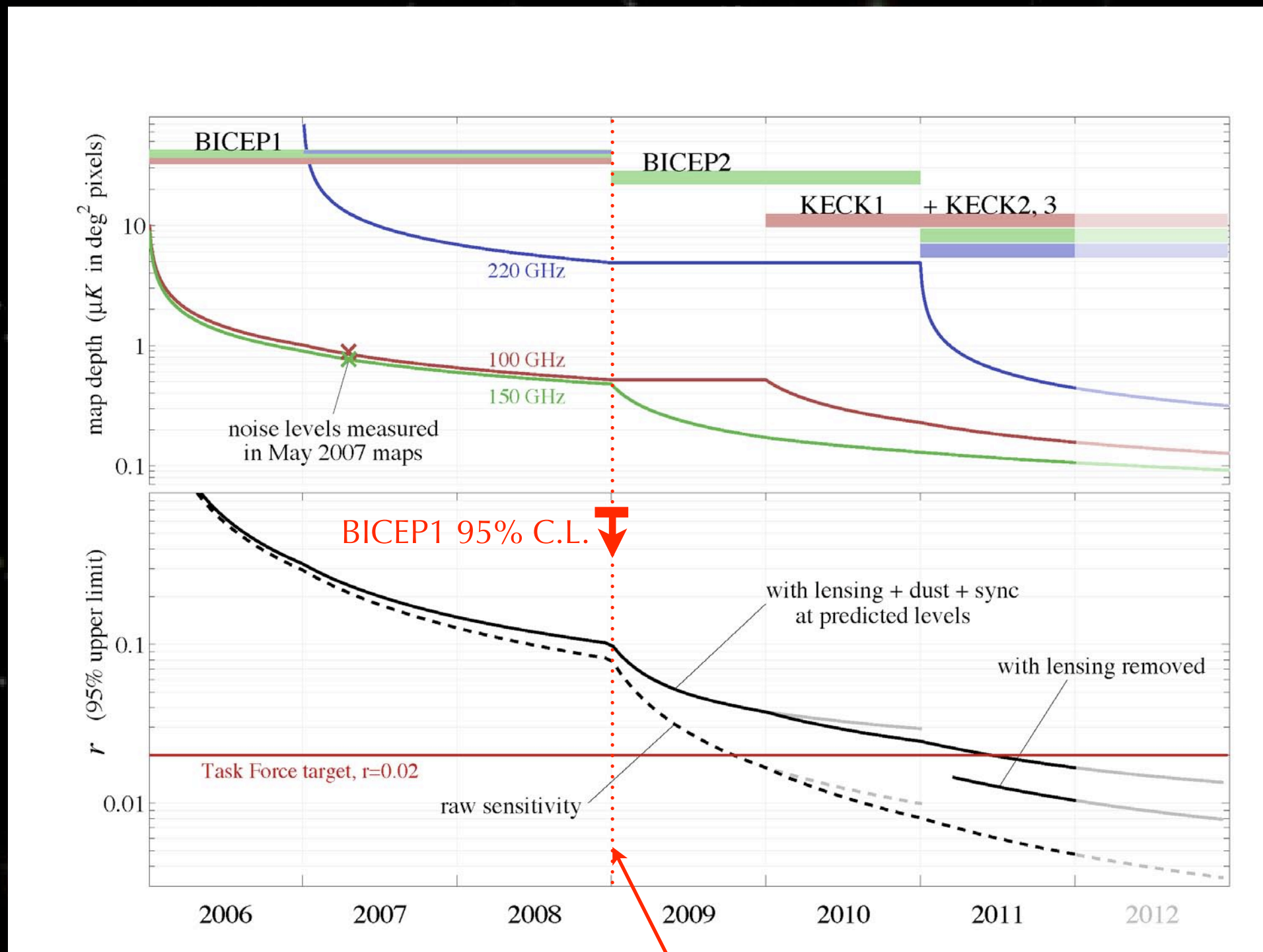
# BICEP, BICEP2, KECK



(A. Lange)



# BICEP, BICEP2, KECK



(A. Lange)

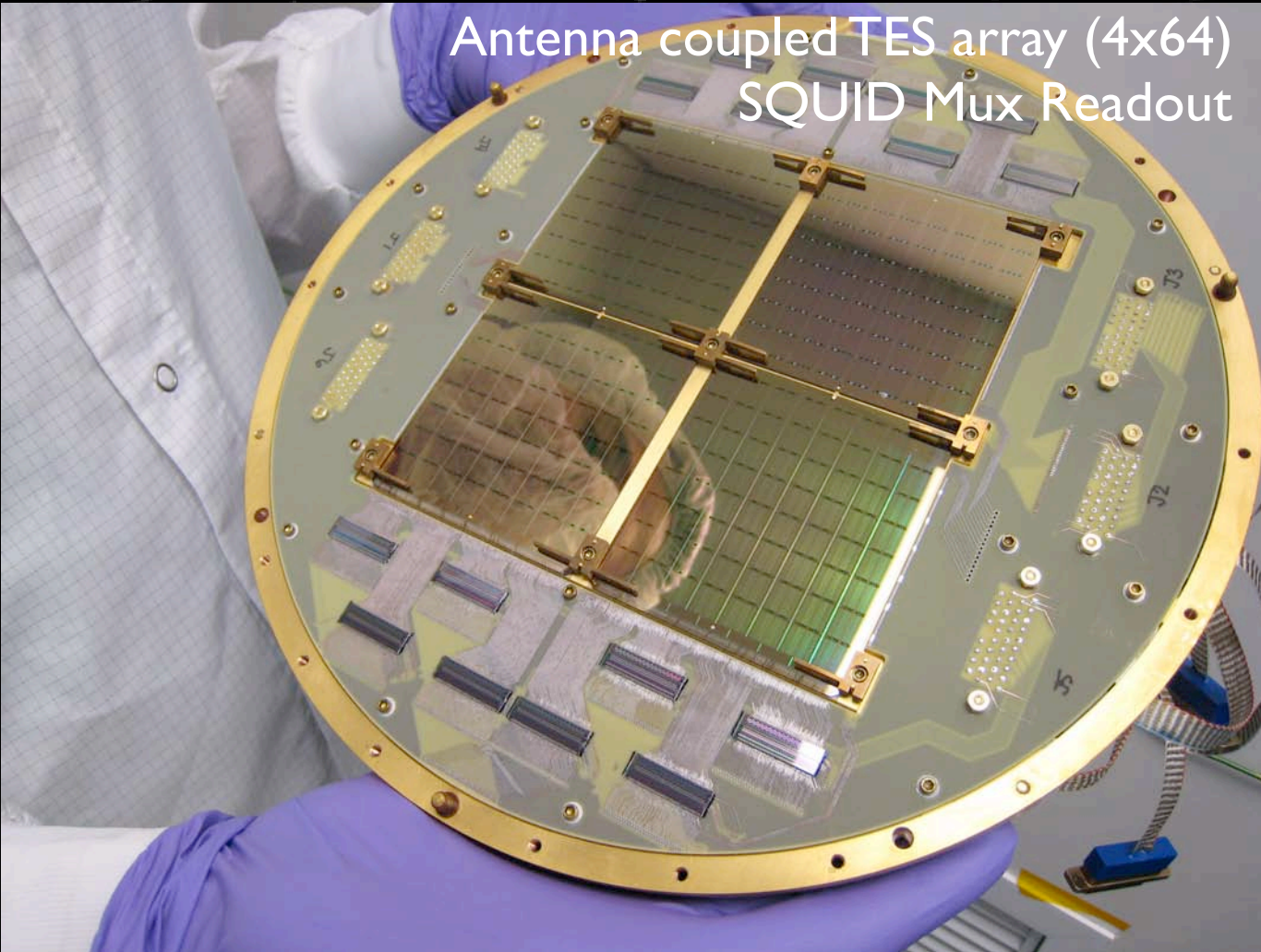
arXiv:0906.1181





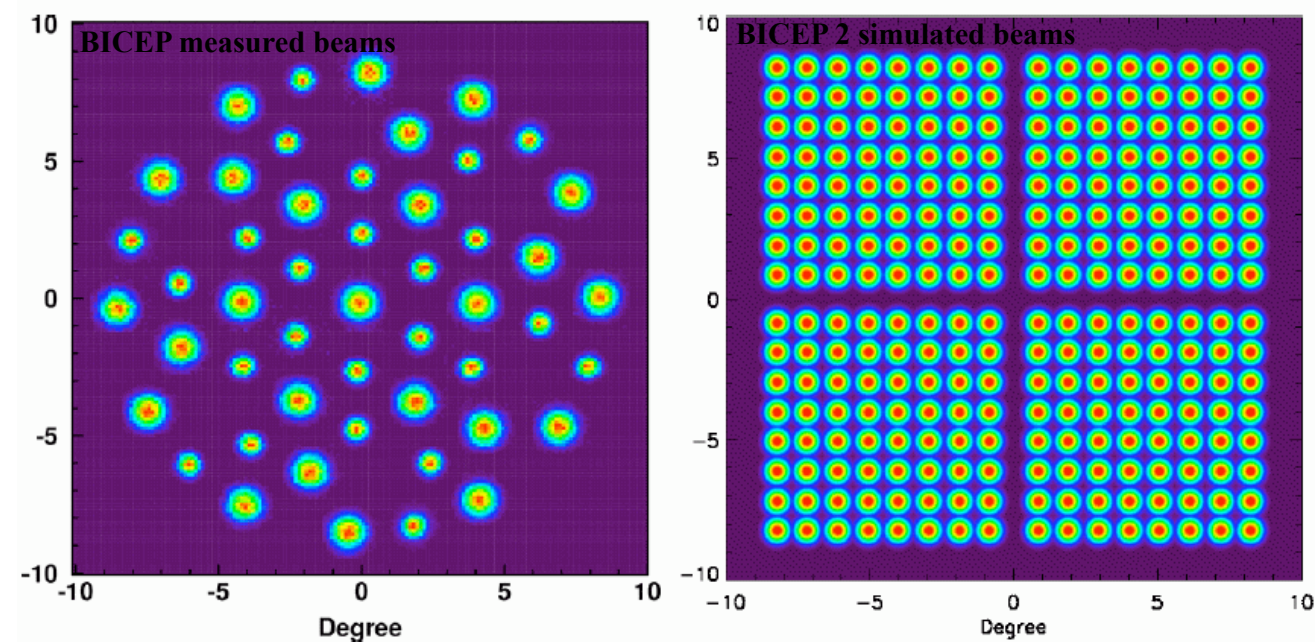
# BICEP

Antenna coupled TES array (4x64)  
SQUID Mux Readout



BICEP2 focal plane, May 2009

Getting more pixels on the sky ...



(A. Lange)

# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires





# l'interférométrie en bref

★ Ligne de base :  $||\vec{u}|| = \frac{D}{\lambda} \quad \ell = 2\pi ||\vec{u}||$

★ Lobe :  $B(\vec{x})$

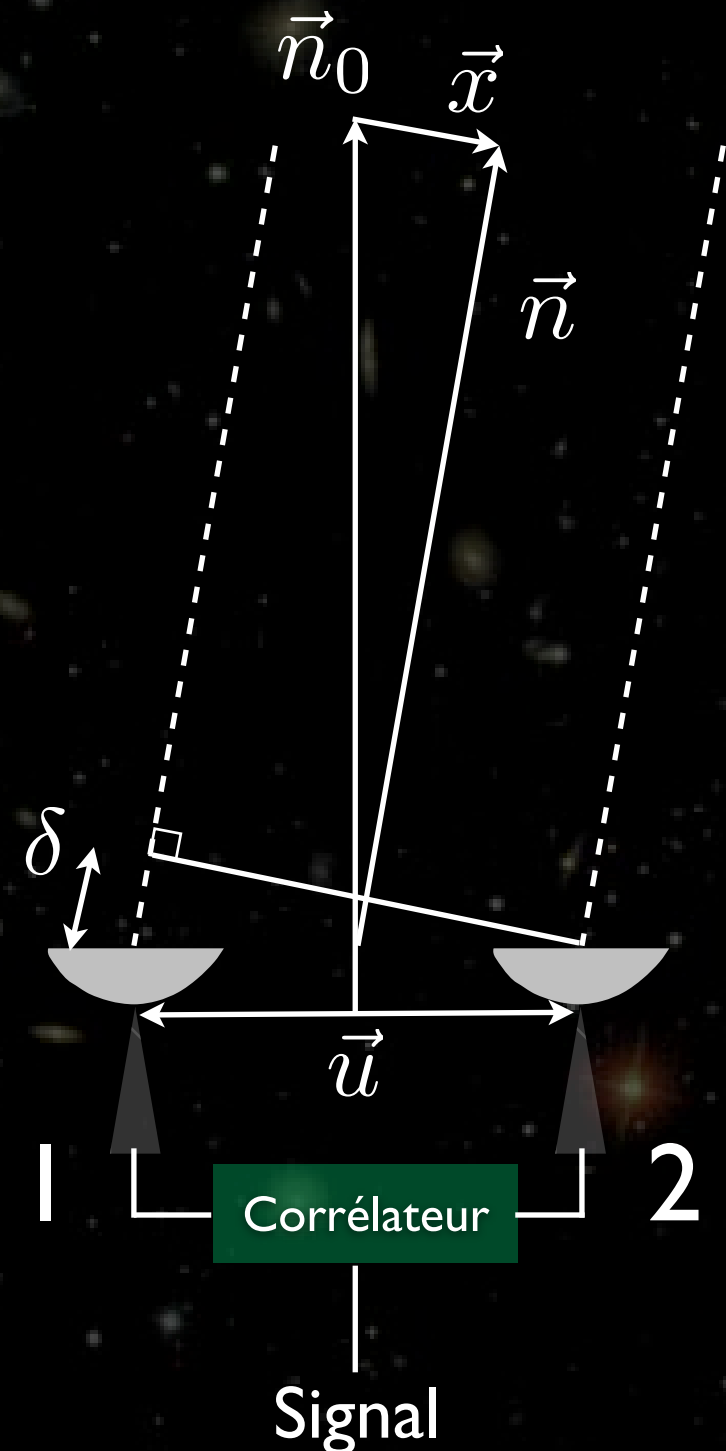
★ Signal en sortie :  $S(\vec{u}) = \int E_1(\vec{n}) E_2^*(\vec{n}) B^2(\vec{n}) d\vec{n}$

★ 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 signal dans le 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 :

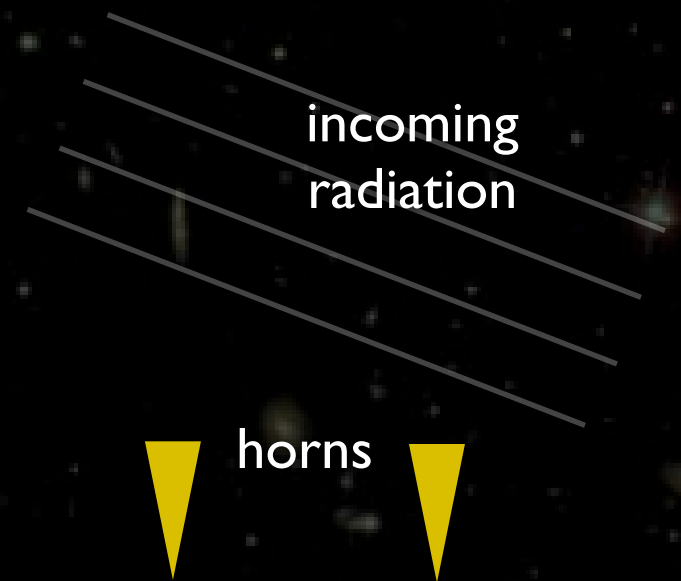
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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 :

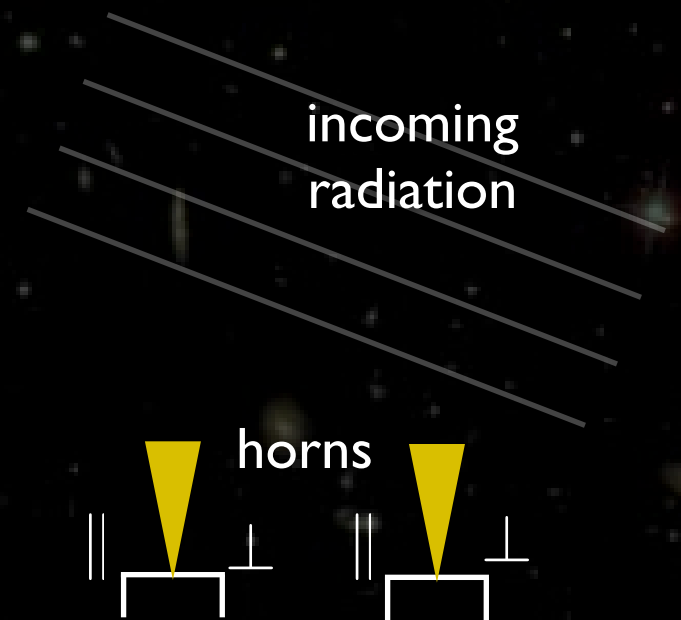
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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 :

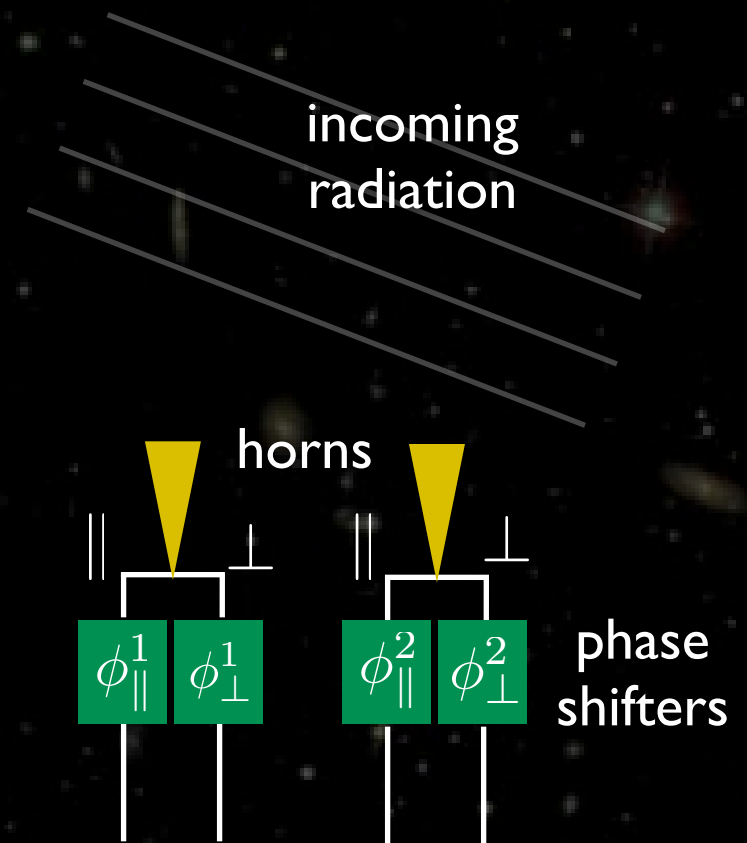
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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 :

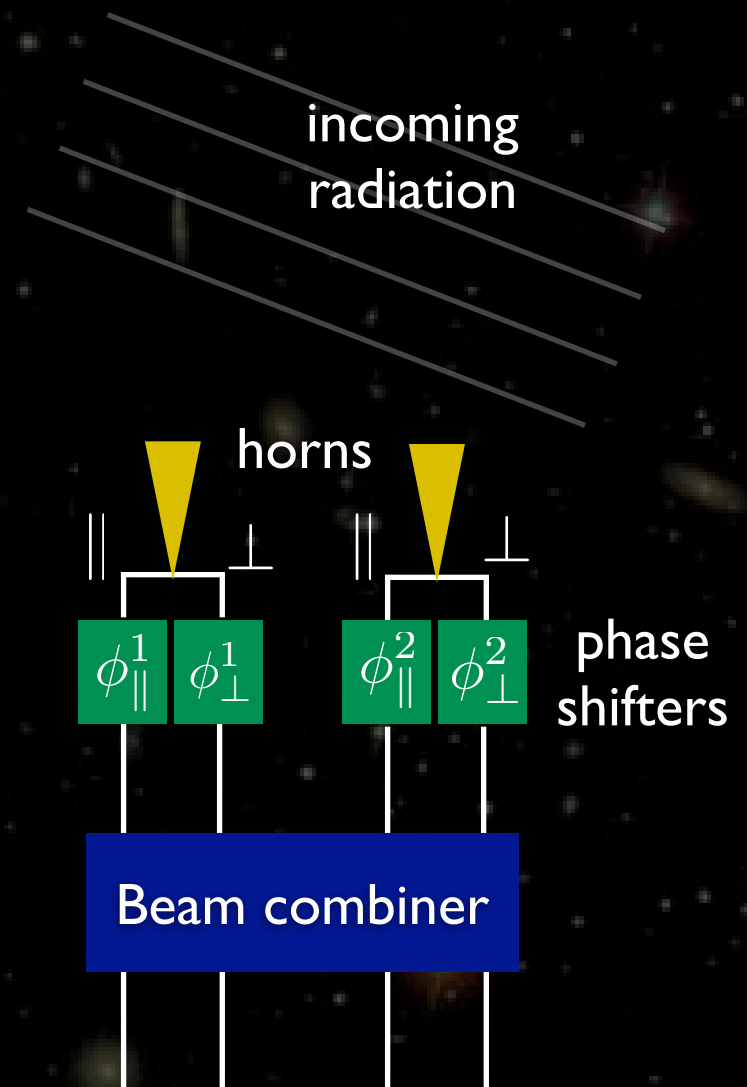
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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 :

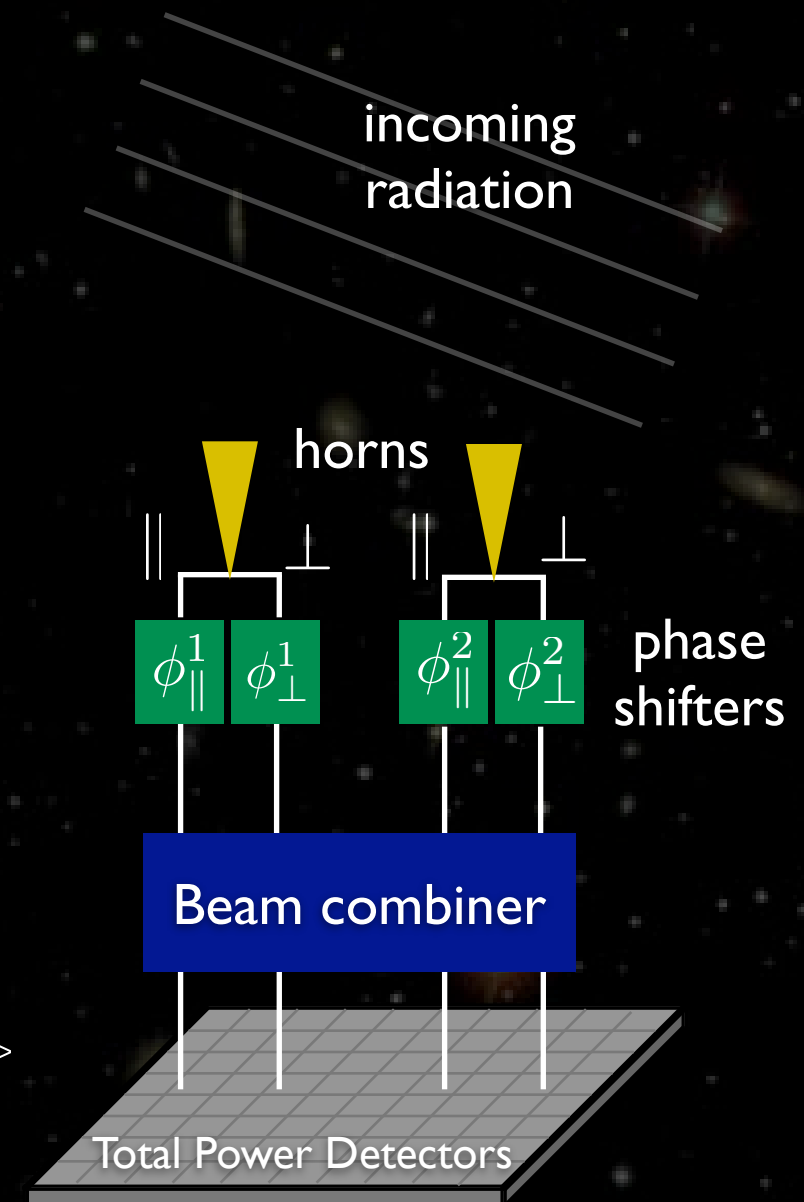
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- Bolomètres :

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

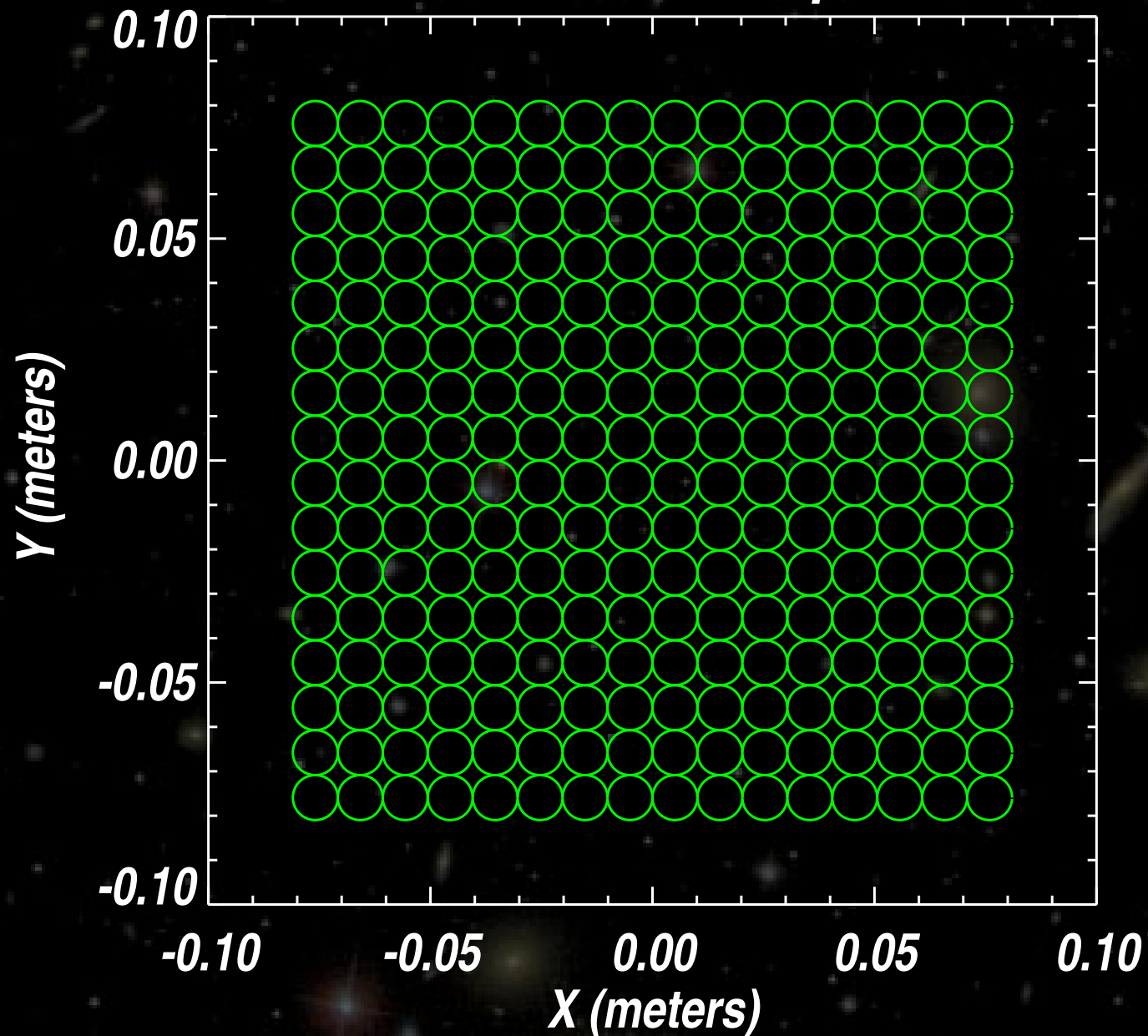
- Interférométrie bolométrique additive :

- 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)



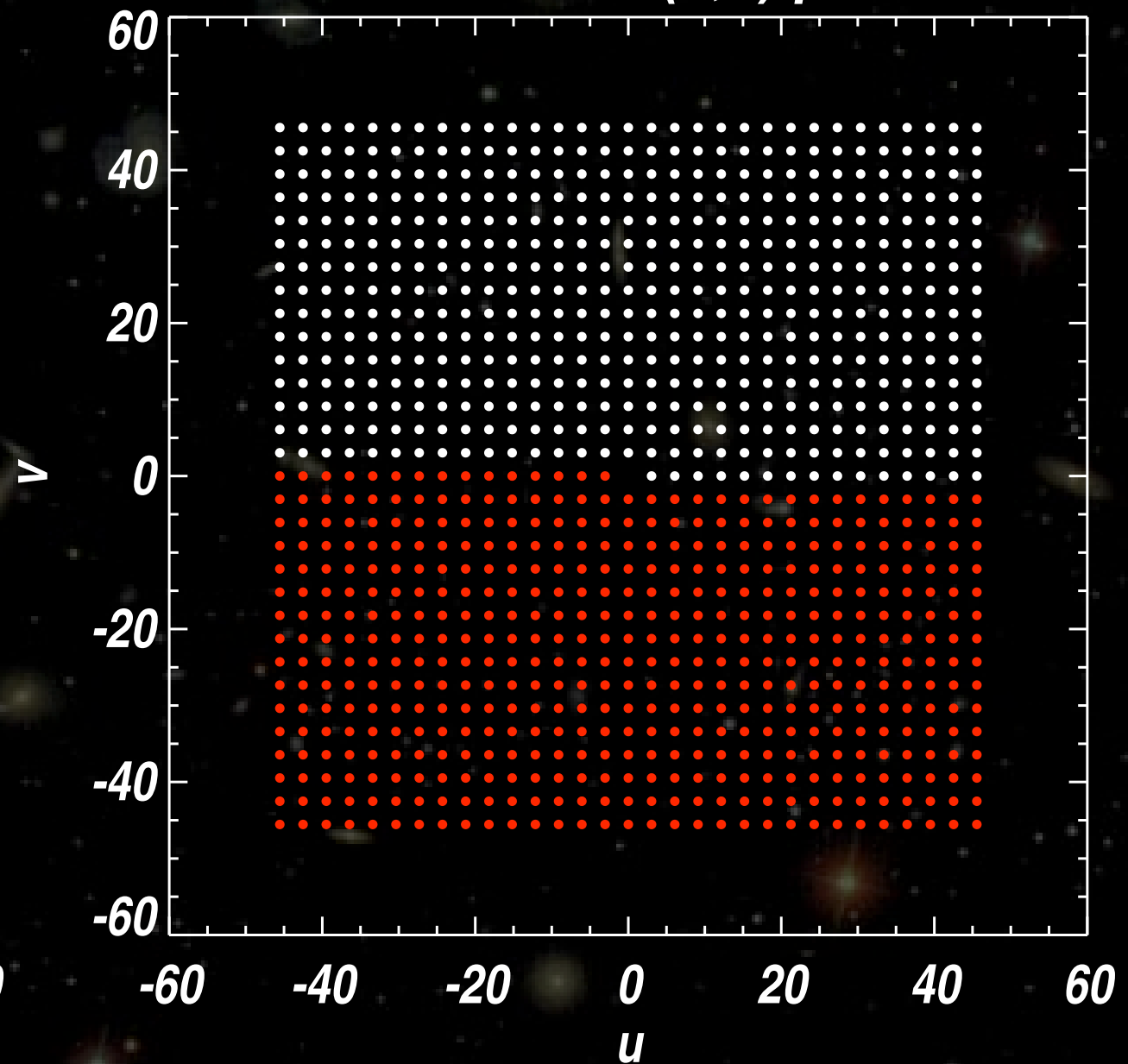
# Cornets et lignes de base

*Horns in receiver plane*



256 Cornets  
90 GHz, FWHM=20 deg. :  $D=1$  cm

*Baselines in (u,v) plane*

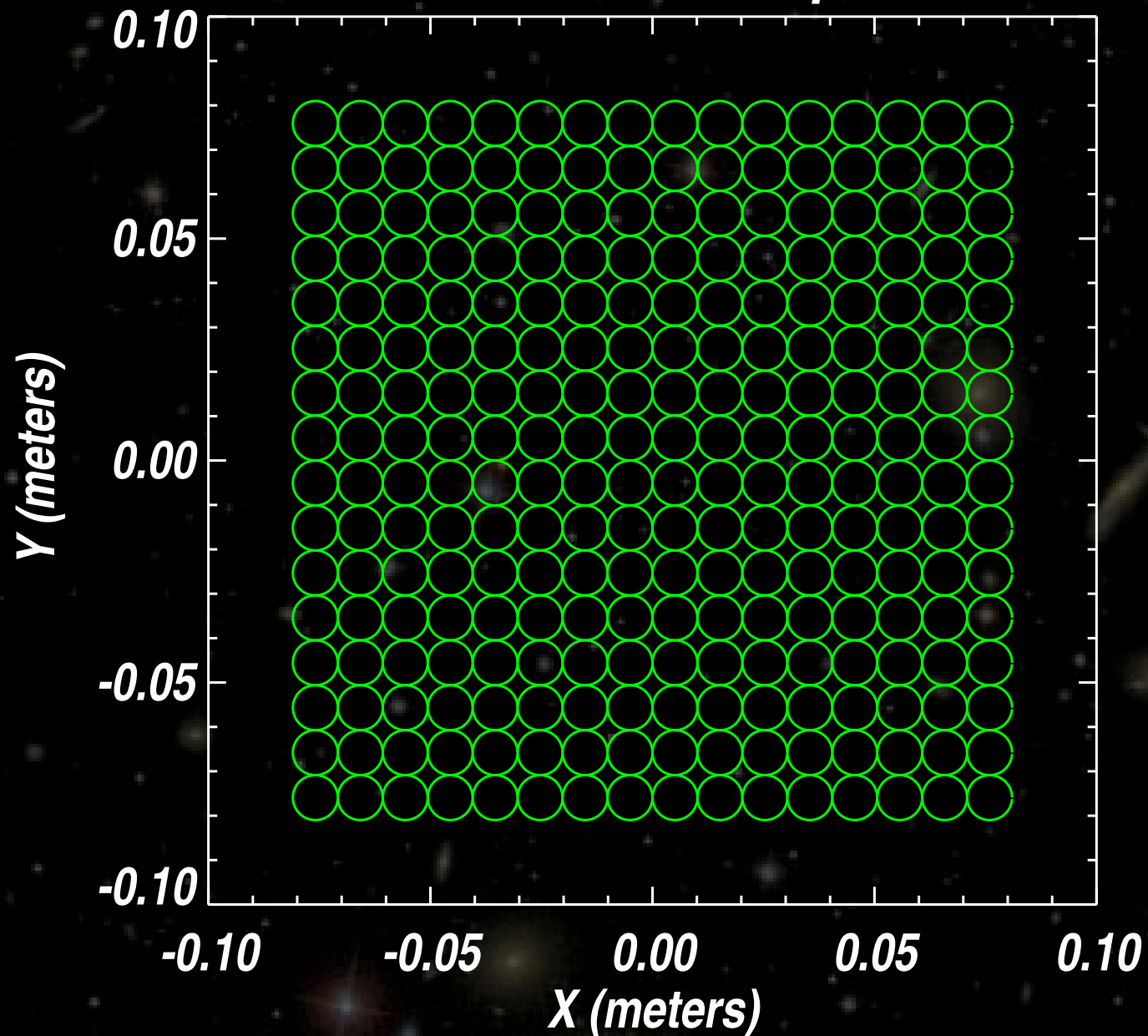


32640 lignes de base  
480 lignes de base différentes



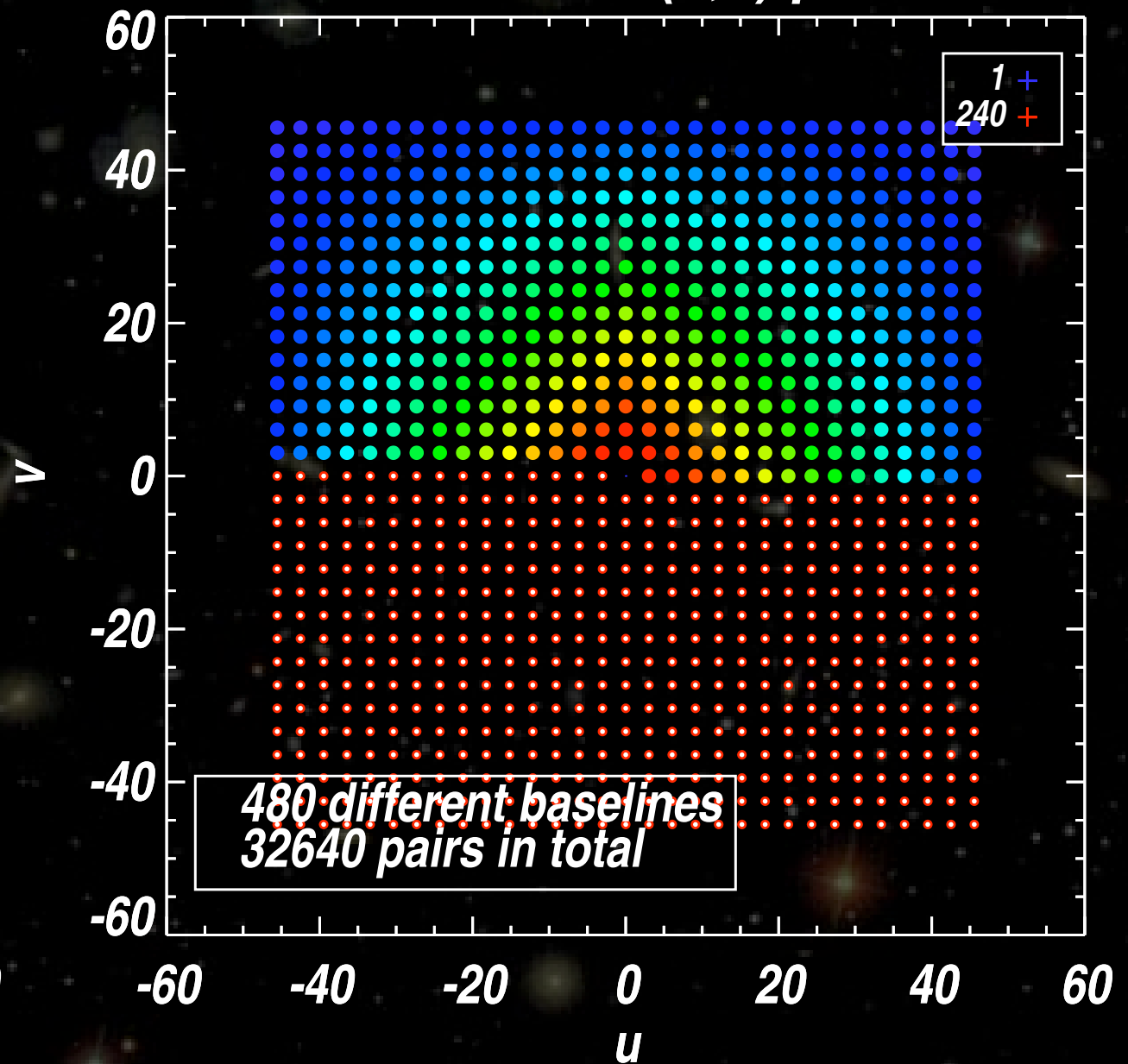
# Cornets et lignes de base

*Horns in receiver plane*



256 Cornets  
90 GHz, FWHM=20 deg. :  $D=1$  cm

*Baselines in (u,v) plane*



32640 lignes de base  
480 lignes de base différentes





# The QUBIC collaboration :

(previously BRAIN and MBI)

University of  
Wisconsin,  
USA

Richmond  
University,  
USA

Brown  
University,  
USA

CS  
Maynooth  
University  
Ireland

CSNSM Orsay France  
France

# APC Paris France

Università di  
Milano-Bicocca  
Italia

IUCAA, Pune,  
India

# La Sapienza, Roma, Italia

Manchester  
University UK

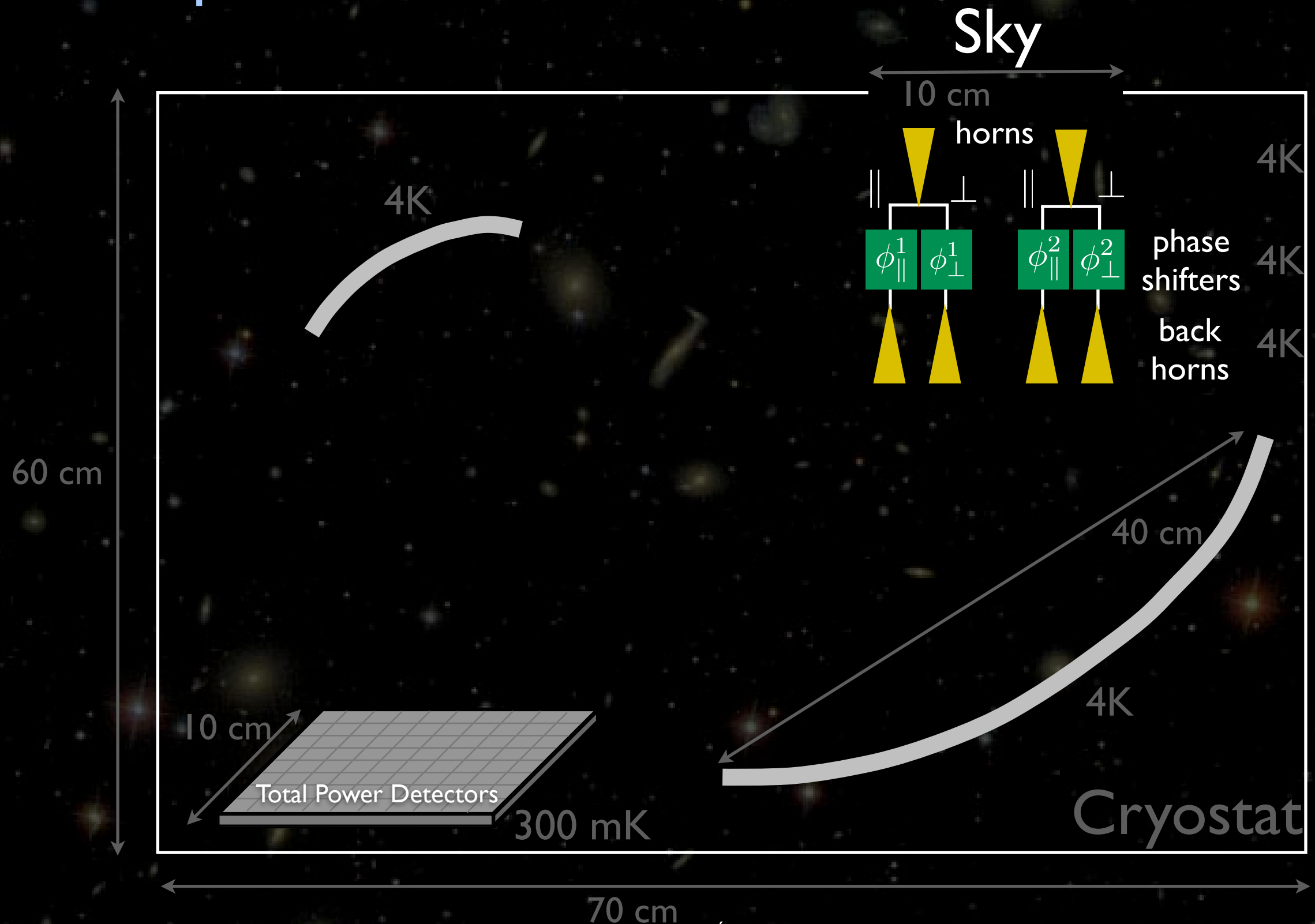
CESR Toulouse  
France

# QU Bolometric Interferometer for Cosmology



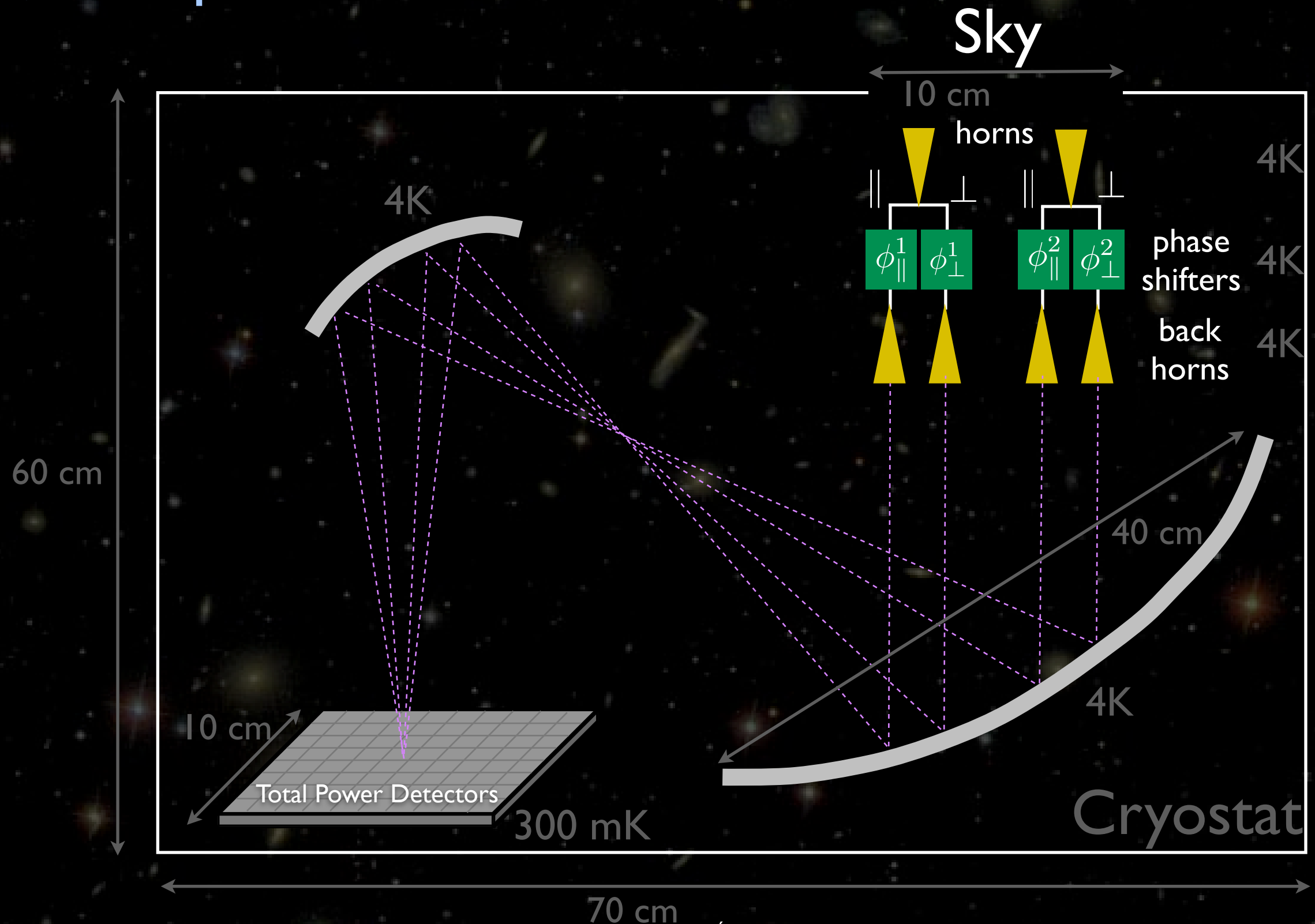
# Le concept de QUBIC

- Quasi-optical Beam Combiner



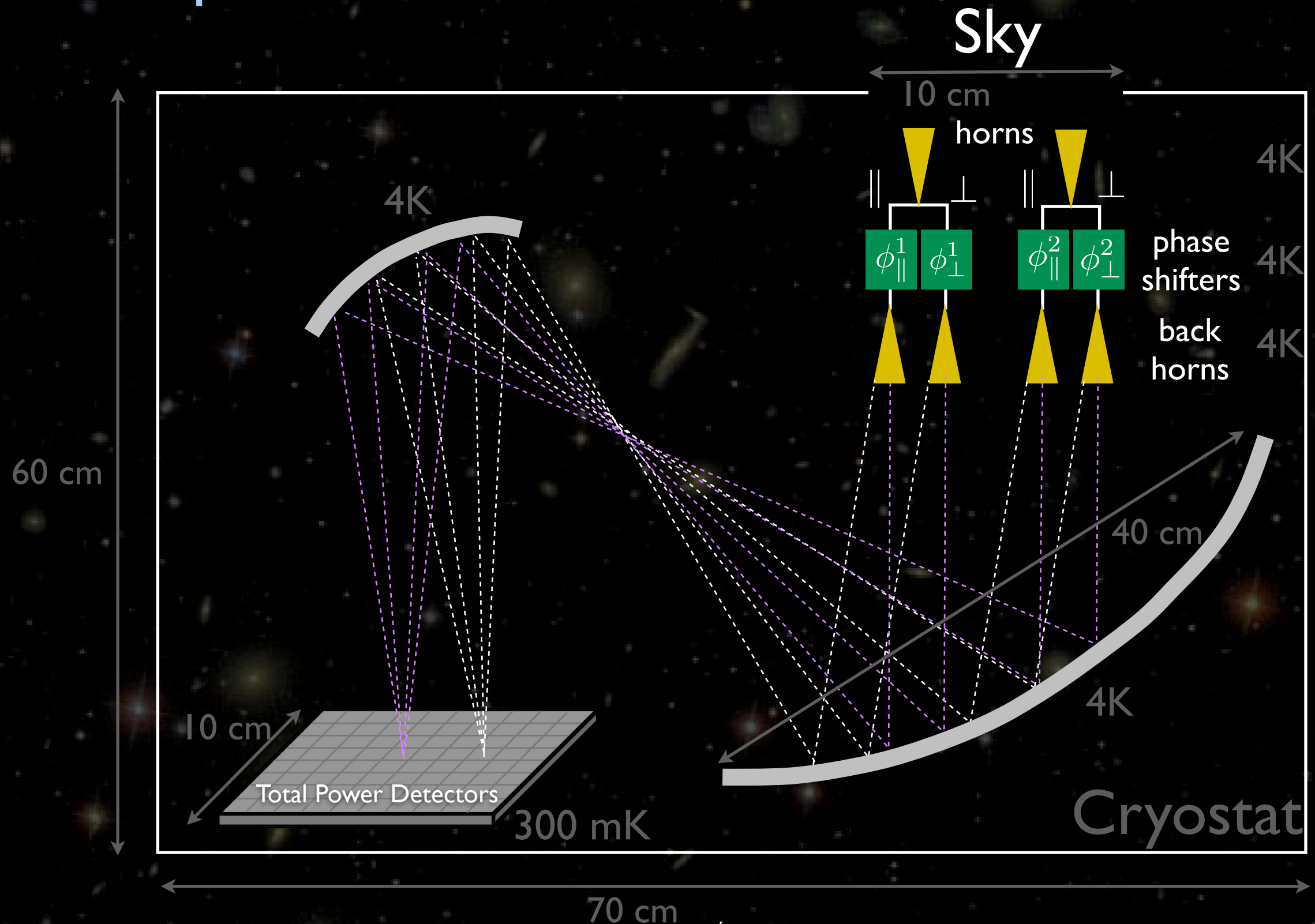
# Le concept de QUBIC

- Quasi-optical Beam Combiner



# Le concept de QUBIC

- 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

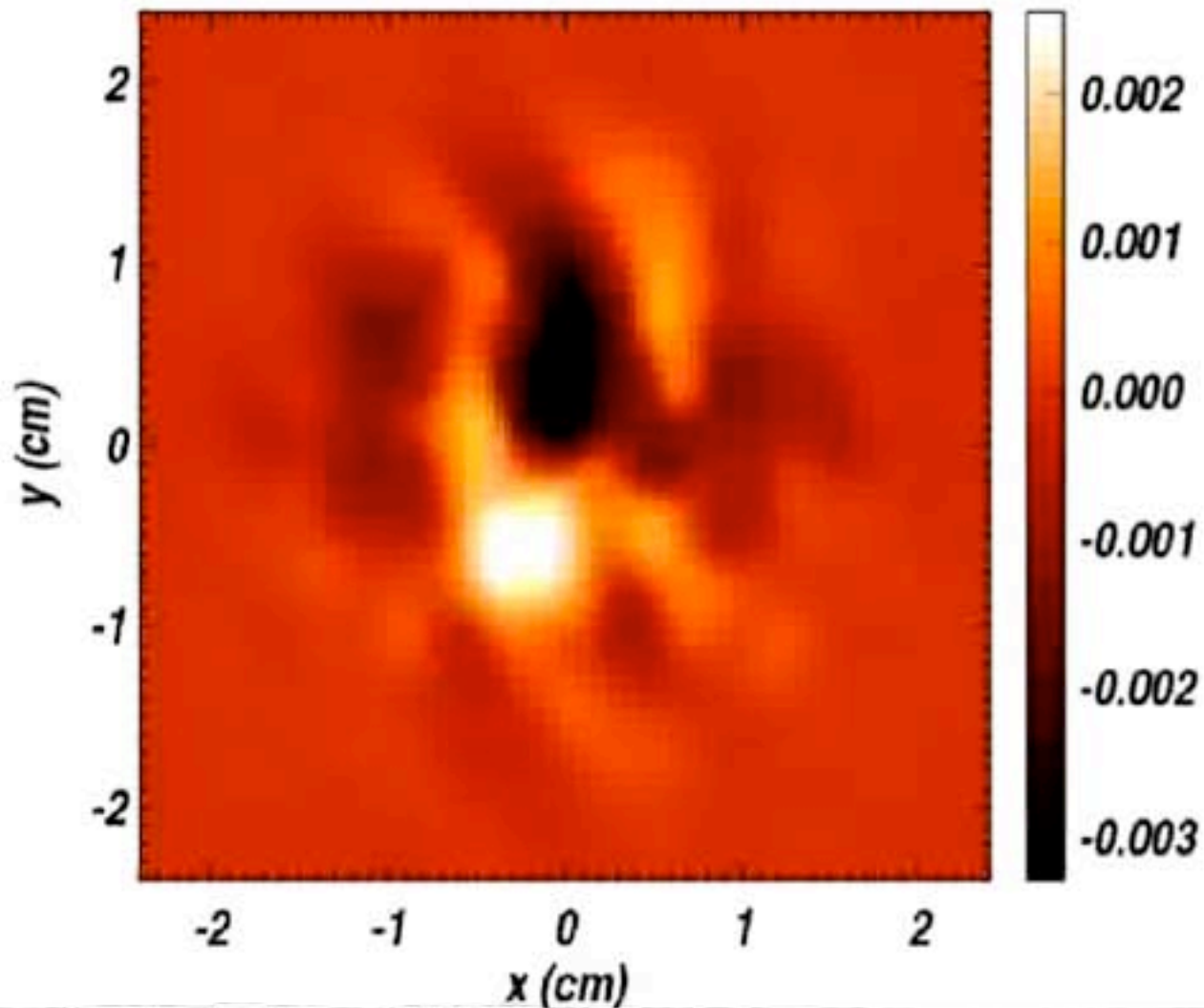
[Charlassier et al., arxiv:0806.0380, A&A 497-3 (2009) 963-971]



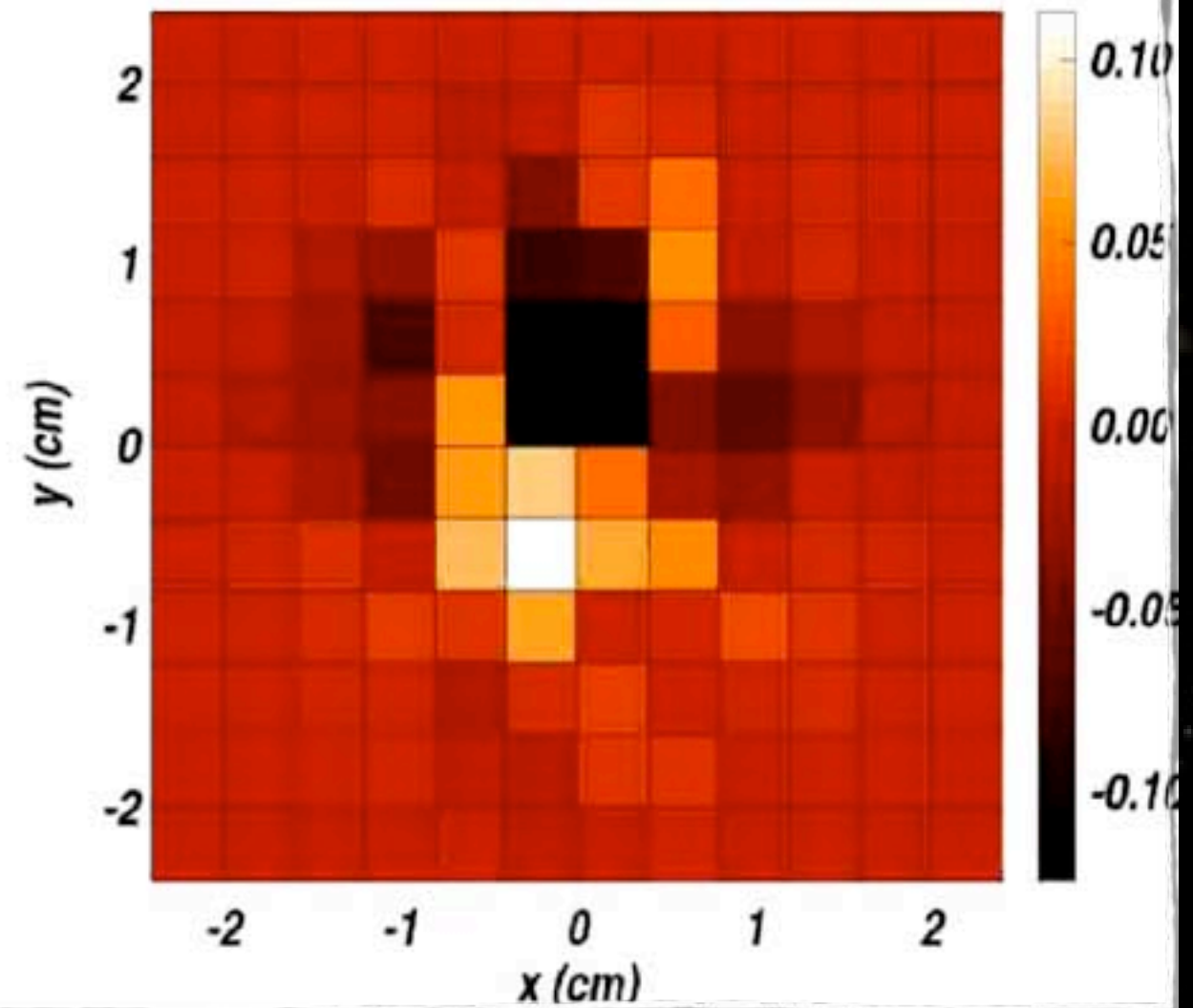


# 64 cornets: Image sur la matrice de bolomètres

Résolution infinie

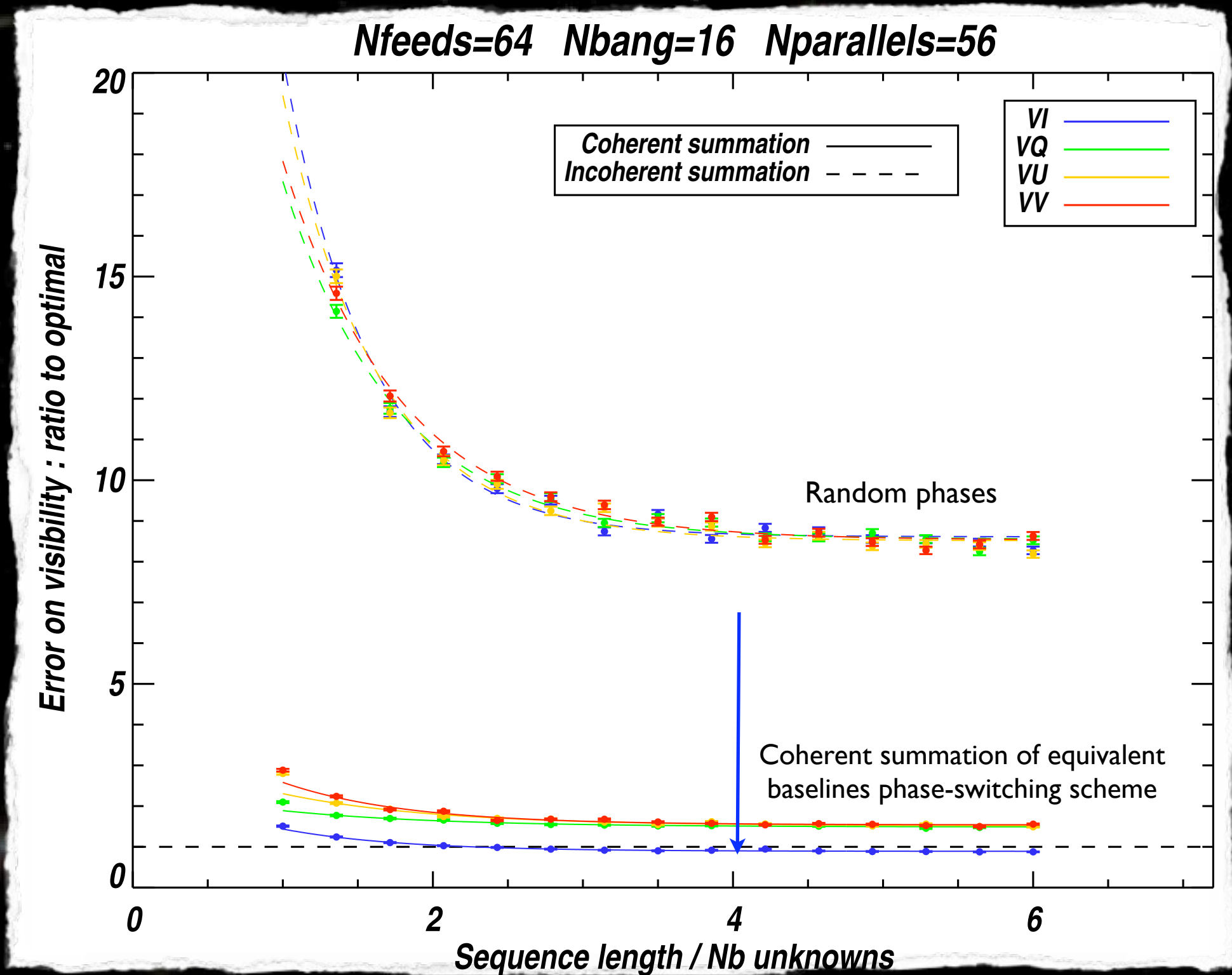


144 bolomètres



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

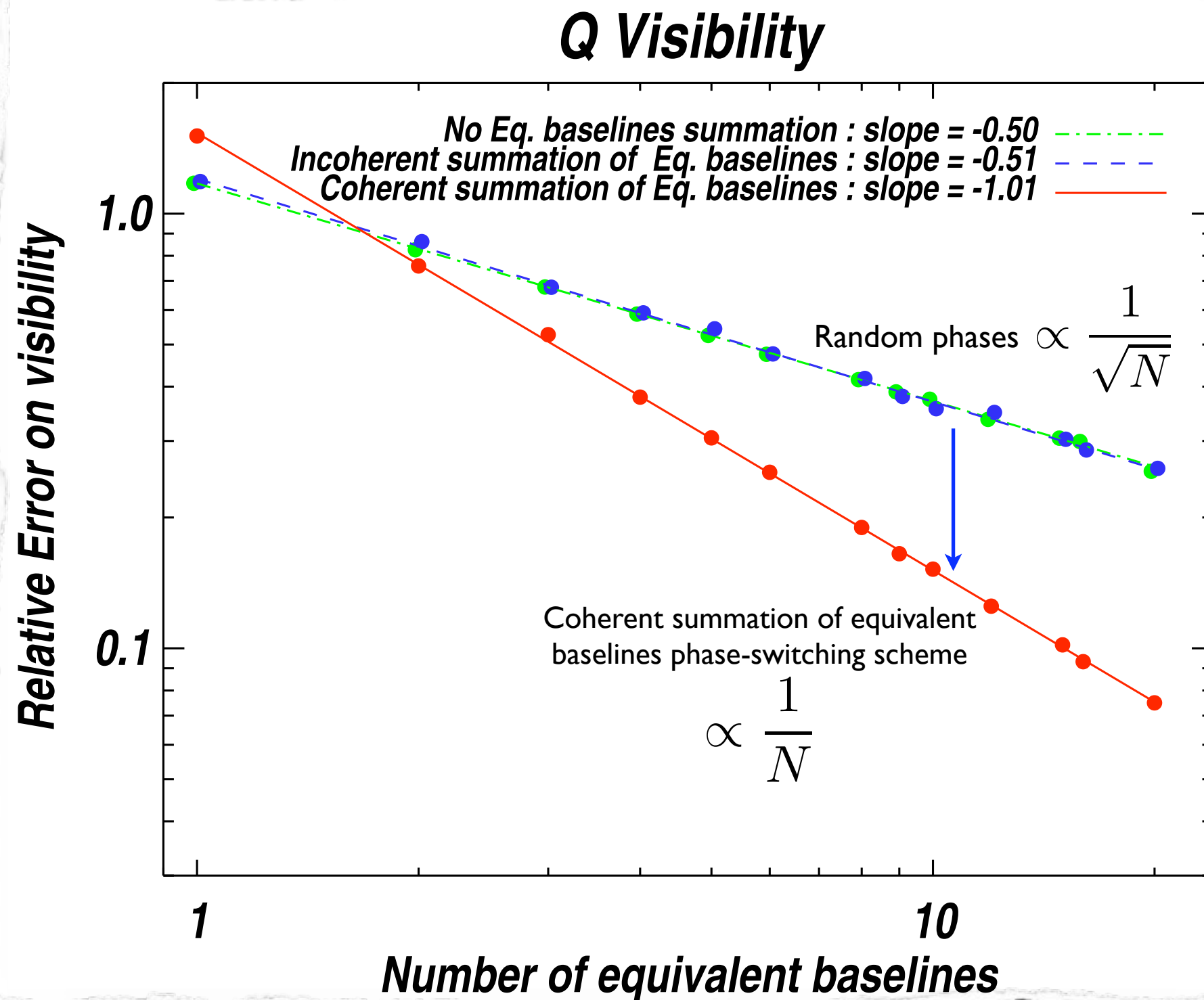
# Précision sur les visibilité



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



# Précision sur les visibilités

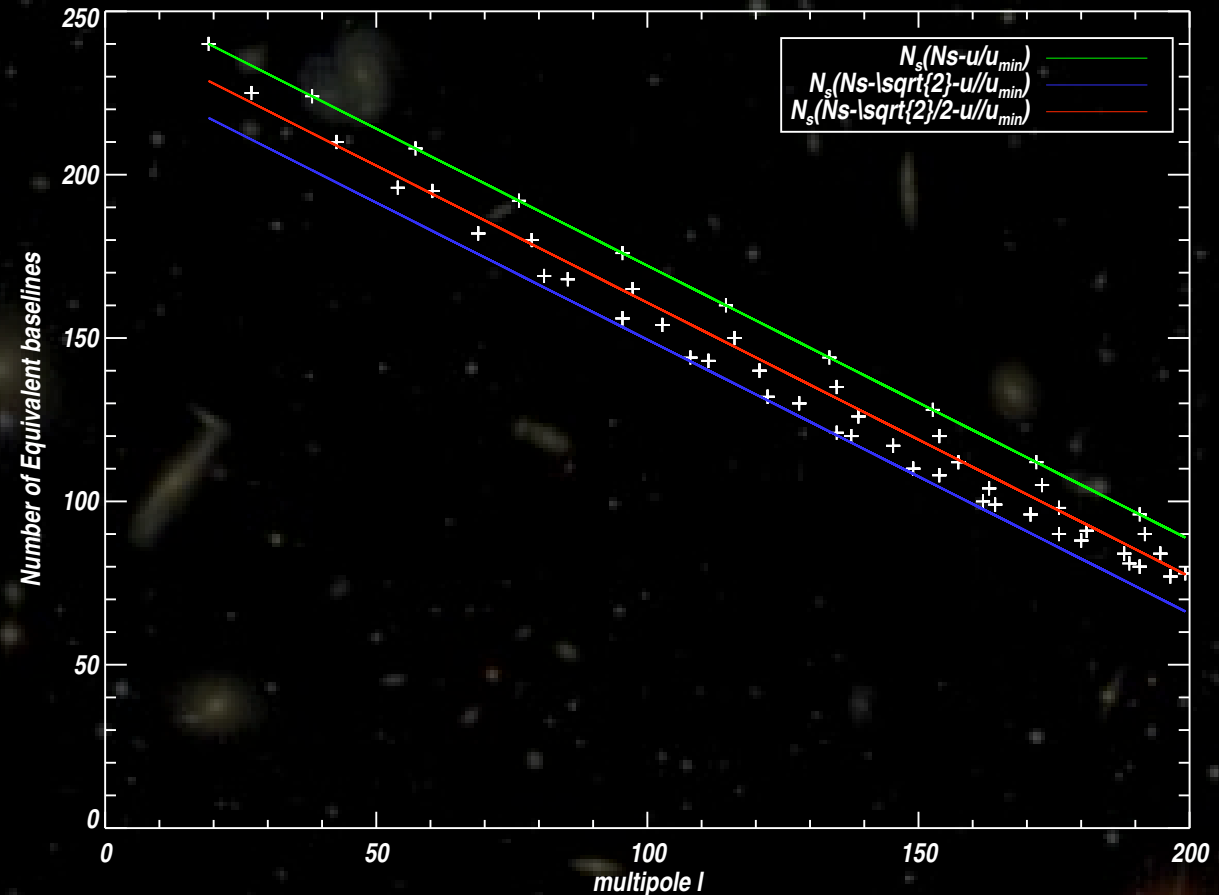
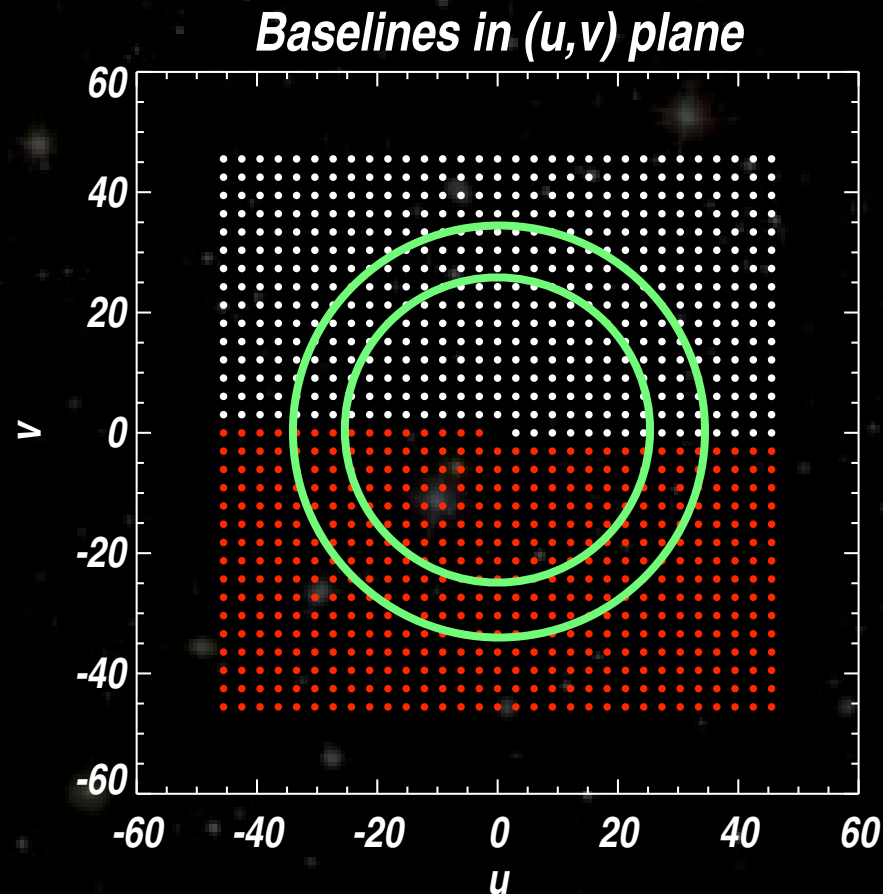


[Charlassier et al., arxiv:0806.0380, A&A 497-3 (2009) 963-971]



# Spectre de Puissance (approx.plane)

- Matrice de covariance des visibilités



➡ Simplement la variance dans un anneau d'épaisseur  $\Delta u = 2\pi\Delta\ell$

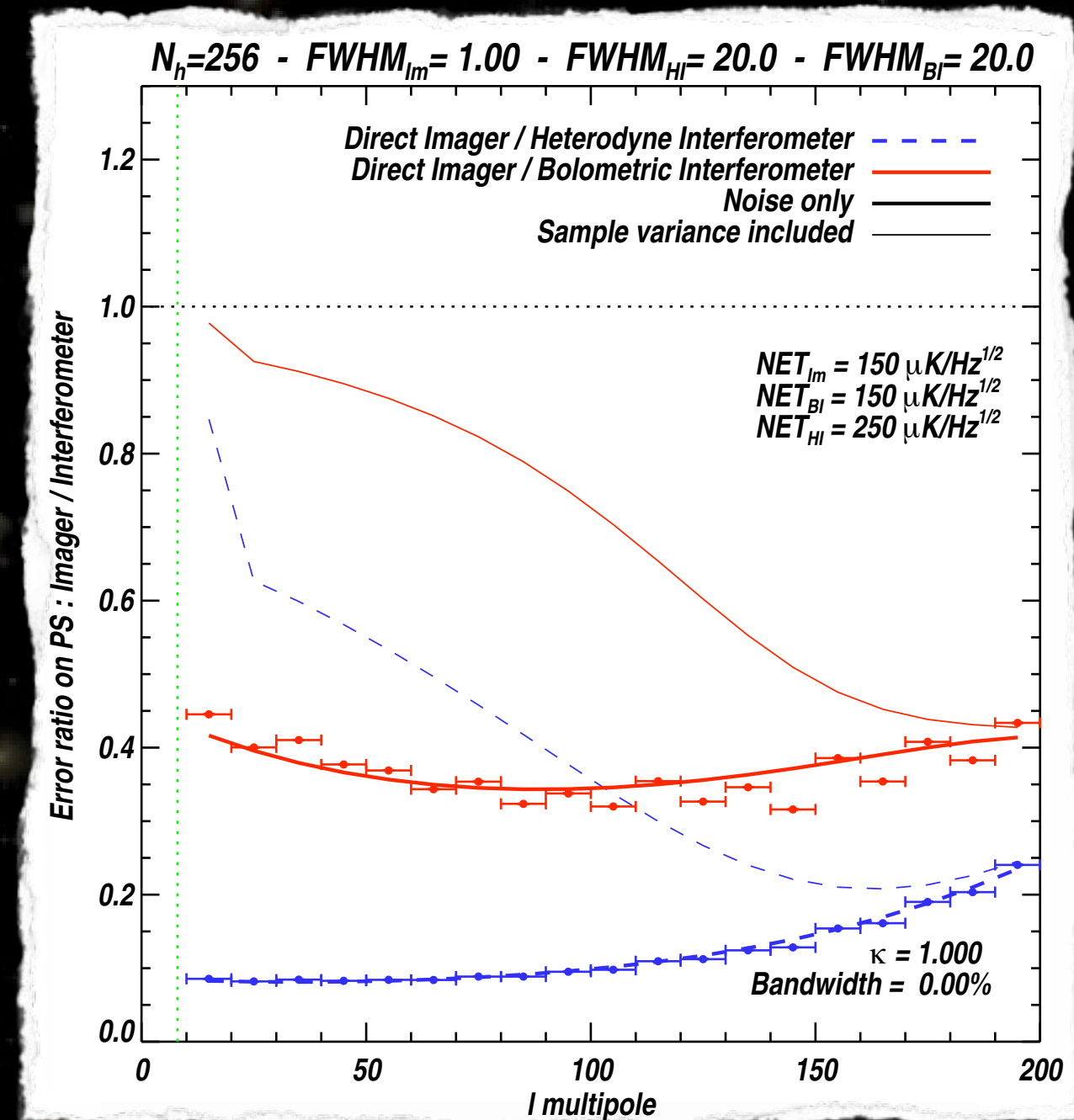
- Prise en compte du bruit et du lissage par le lobe synthétique

- Maximum de vraisemblance (Erreurs statistiques avec matrice de Fisher)
- Pseudo-spectre de puissance (Erreurs statistiques par Monte-Carlo)



# 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)



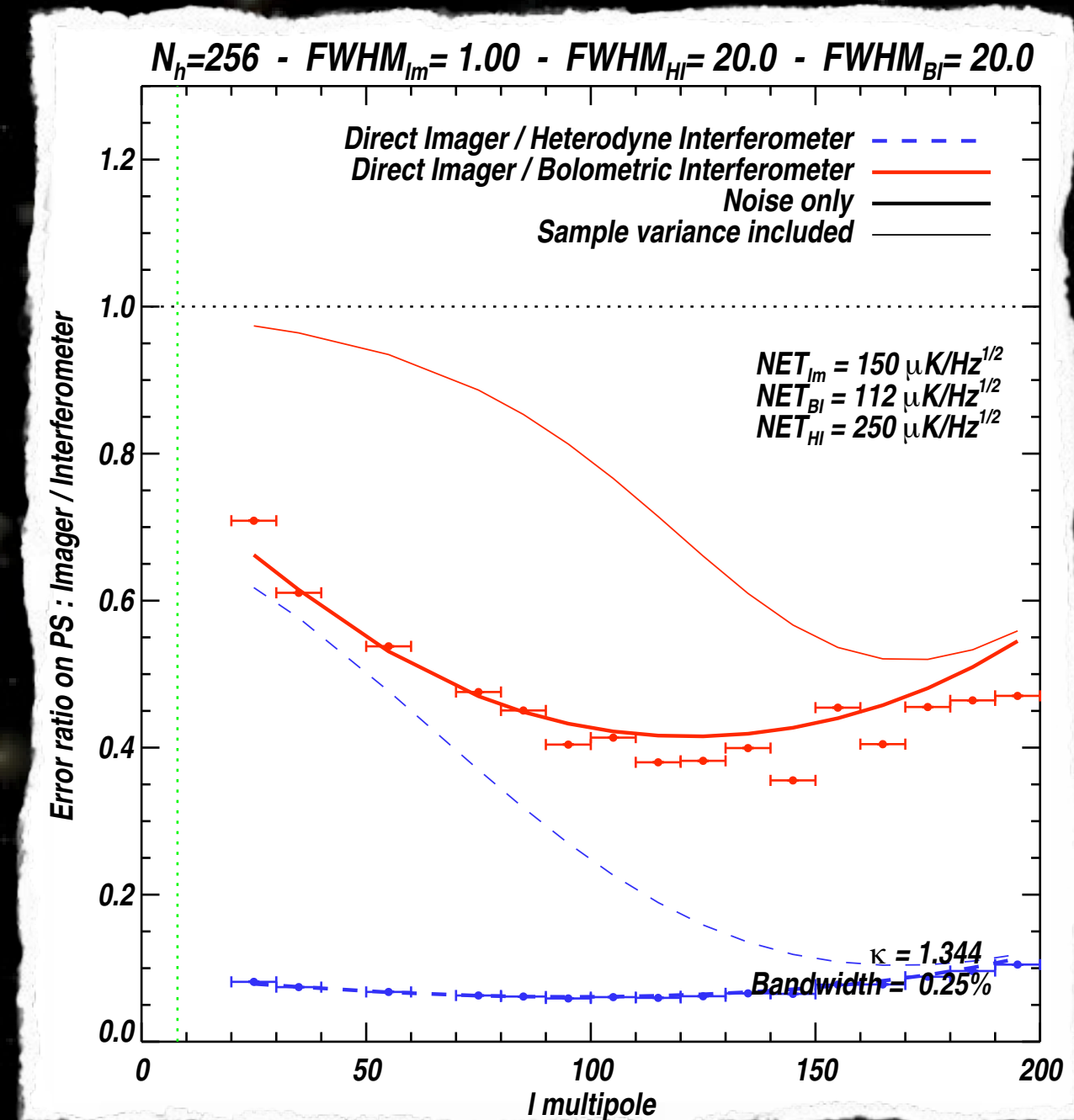
[Hamilton et al., arxiv:0807.0438, A&A 491-3 (2008) 923-927]  
(updated with Bandwidth and accurate NET calculations)

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



# 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 !



# Design QUBIC

- 6 modules de 144 cornets

- ★ ~ 10000 lignes de base / module
- ★ Cornets primaires de 14 deg. FWHM
- ★ Configuration carrée compacte
- ★ multipoles : 25-150
- ★ ~900 bolomètres TES / module

- 3 canaux

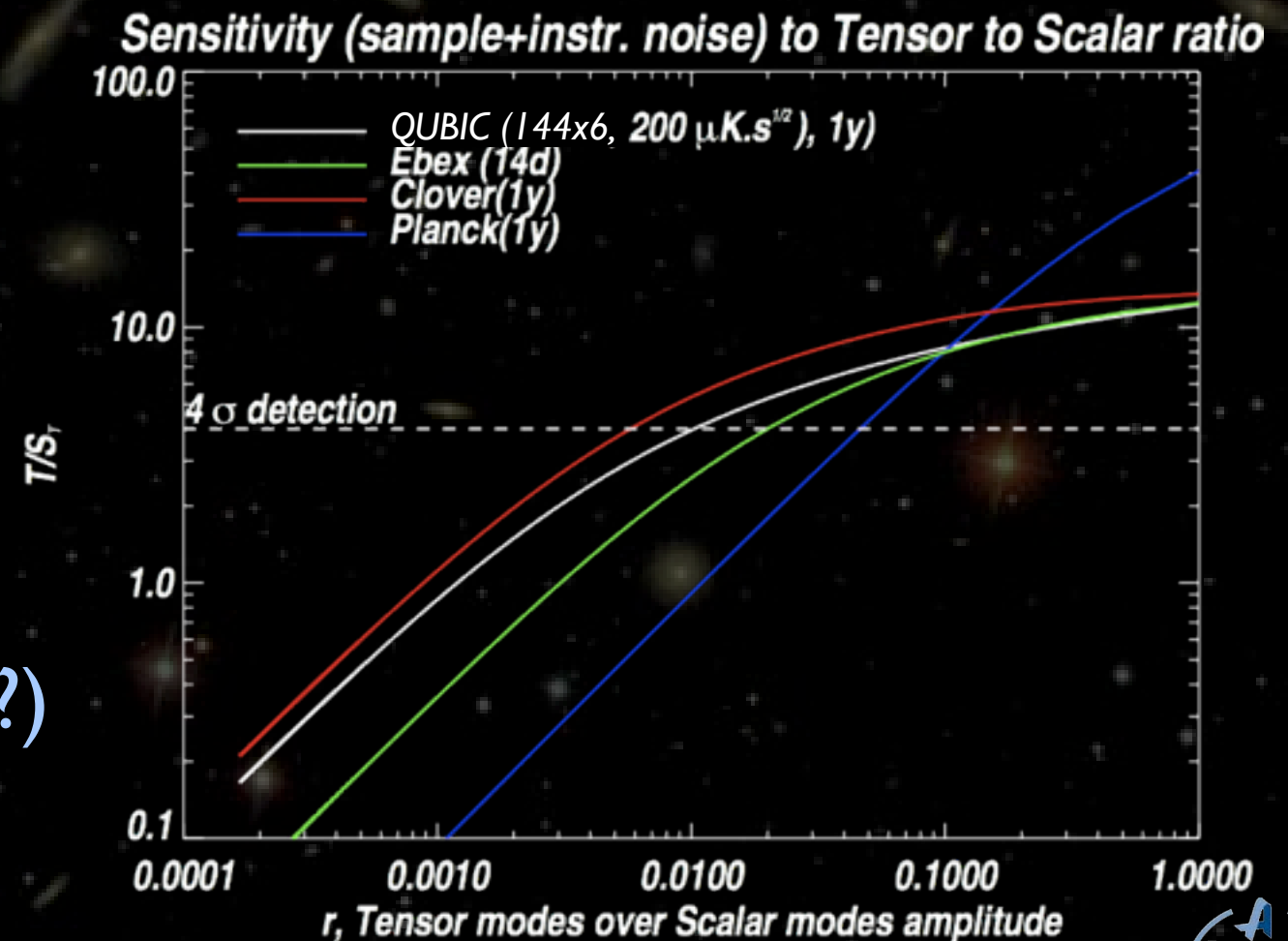
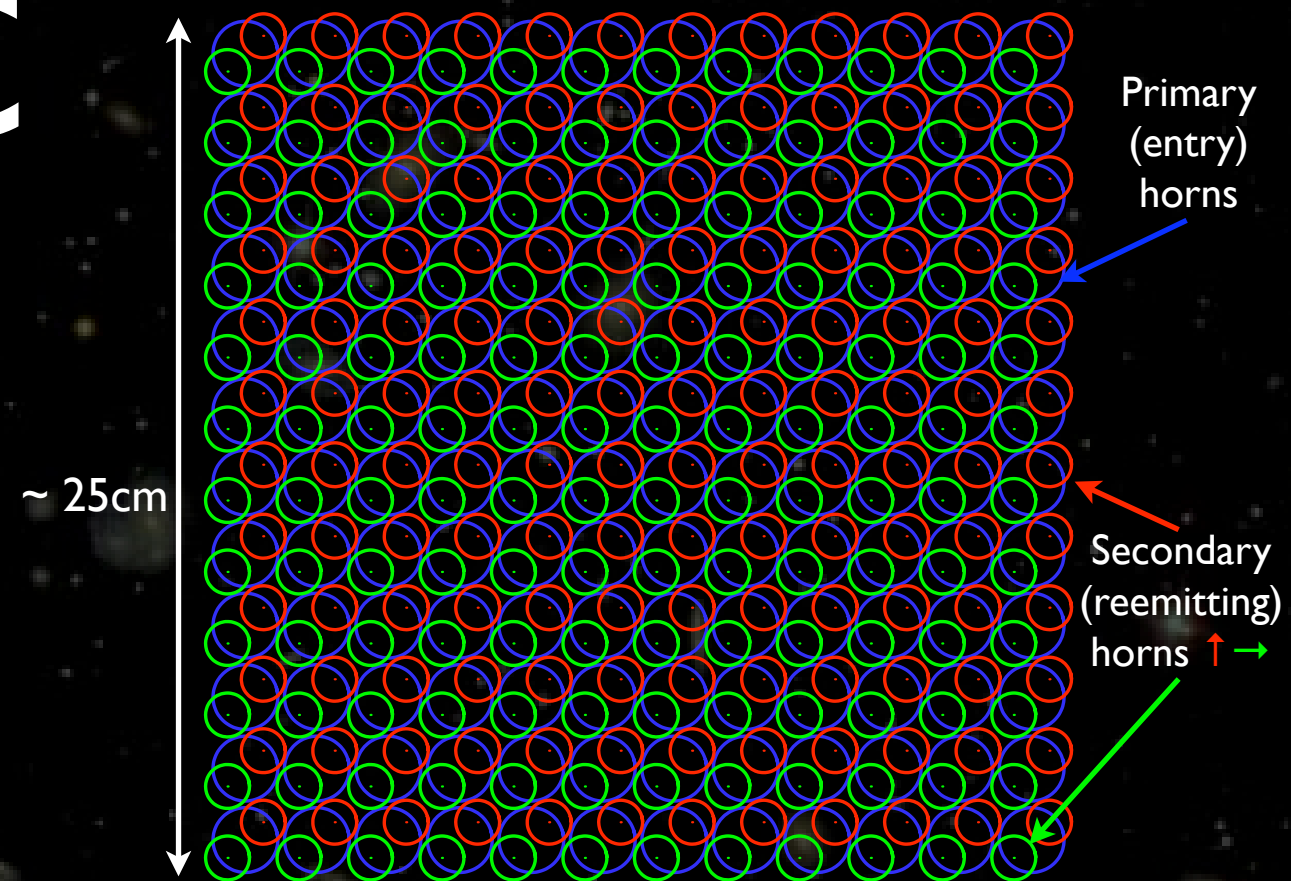
- ★ 90, 150, 220 GHz
- ★ 25% de largeur de bande

- Cryogénie modulaire :

- ★ Pulse Tube à 4K
- ★ Plan focal à 100 mK (dilution)

- Opérations continues (Dôme C?)

- $r \sim 0.01$  avec un an de données





# Design QUBIC

- 6 modules de 144 cornets

- ★ ~ 10000 lignes de base / module
- ★ Cornets primaires de 14 deg. FWHM
- ★ Configuration carrée compacte
- ★ multipoles : 25-150
- ★ ~900 bolomètres TES / module

- 3 canaux

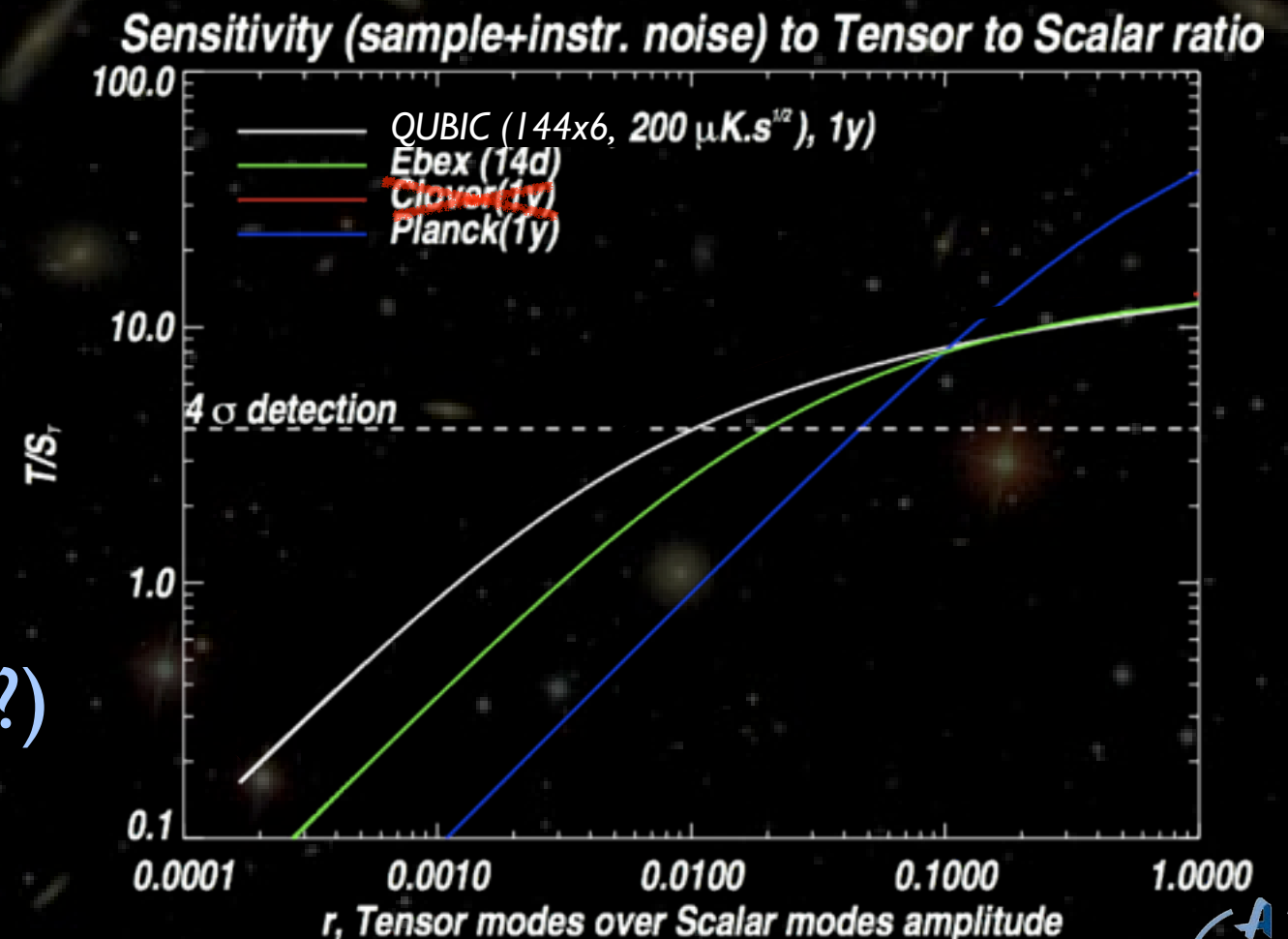
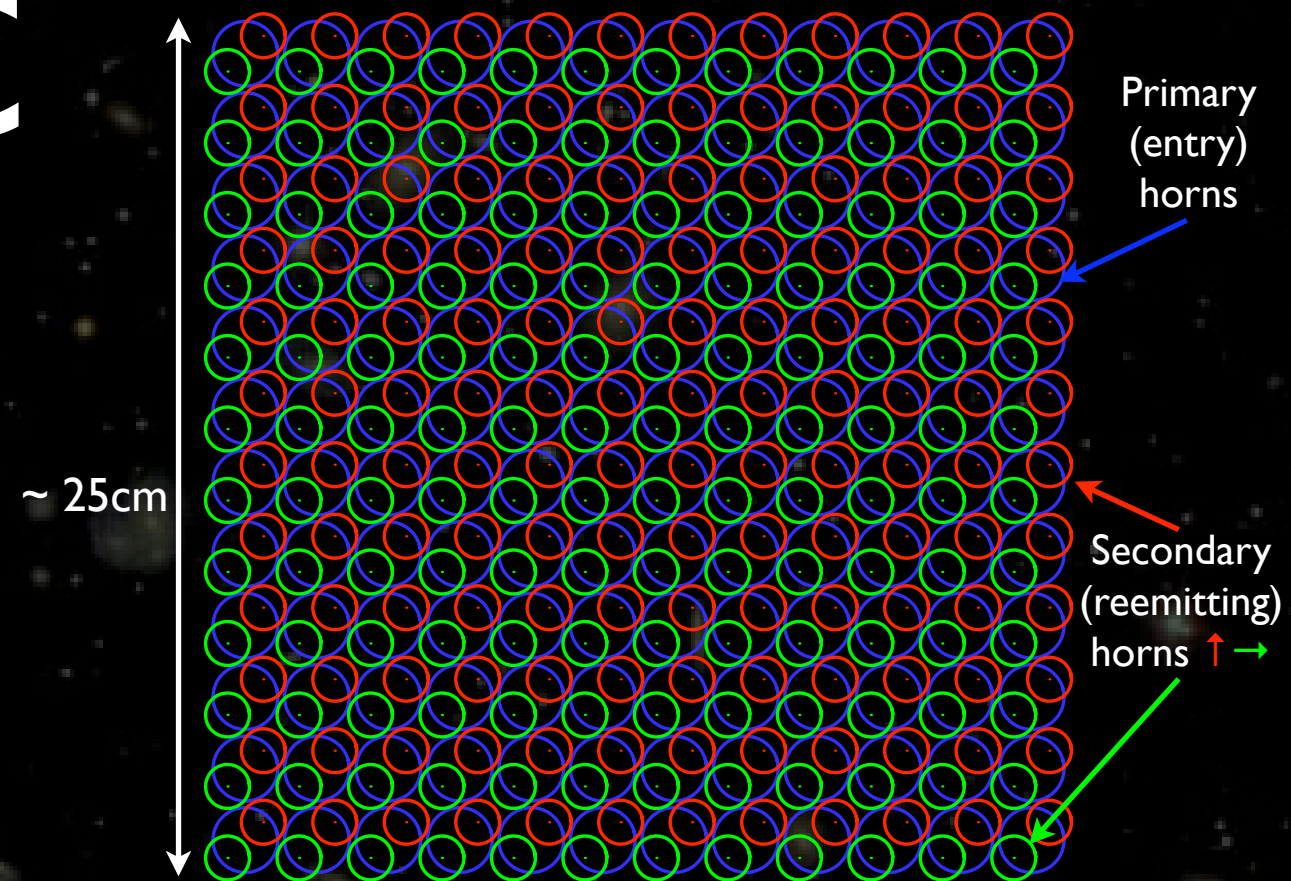
- ★ 90, 150, 220 GHz
- ★ 25% de largeur de bande

- Cryogénie modulaire :

- ★ Pulse Tube à 4K
- ★ Plan focal à 100 mK (dilution)

- Opérations continues (Dôme C?)

- $r \sim 0.01$  avec un an de données





# Plan du cours

- Origine du CMB et intérêt pour la cosmologie
- Résultats actuels et perspectives de Planck
- Inflation, modes tenseur et polarisation B
- La quête des modes B
  - ★ Imageurs
  - ★ Interférométrie (bolométrique)
- Les petites échelles angulaires



# Le CMB sous l'arcminute

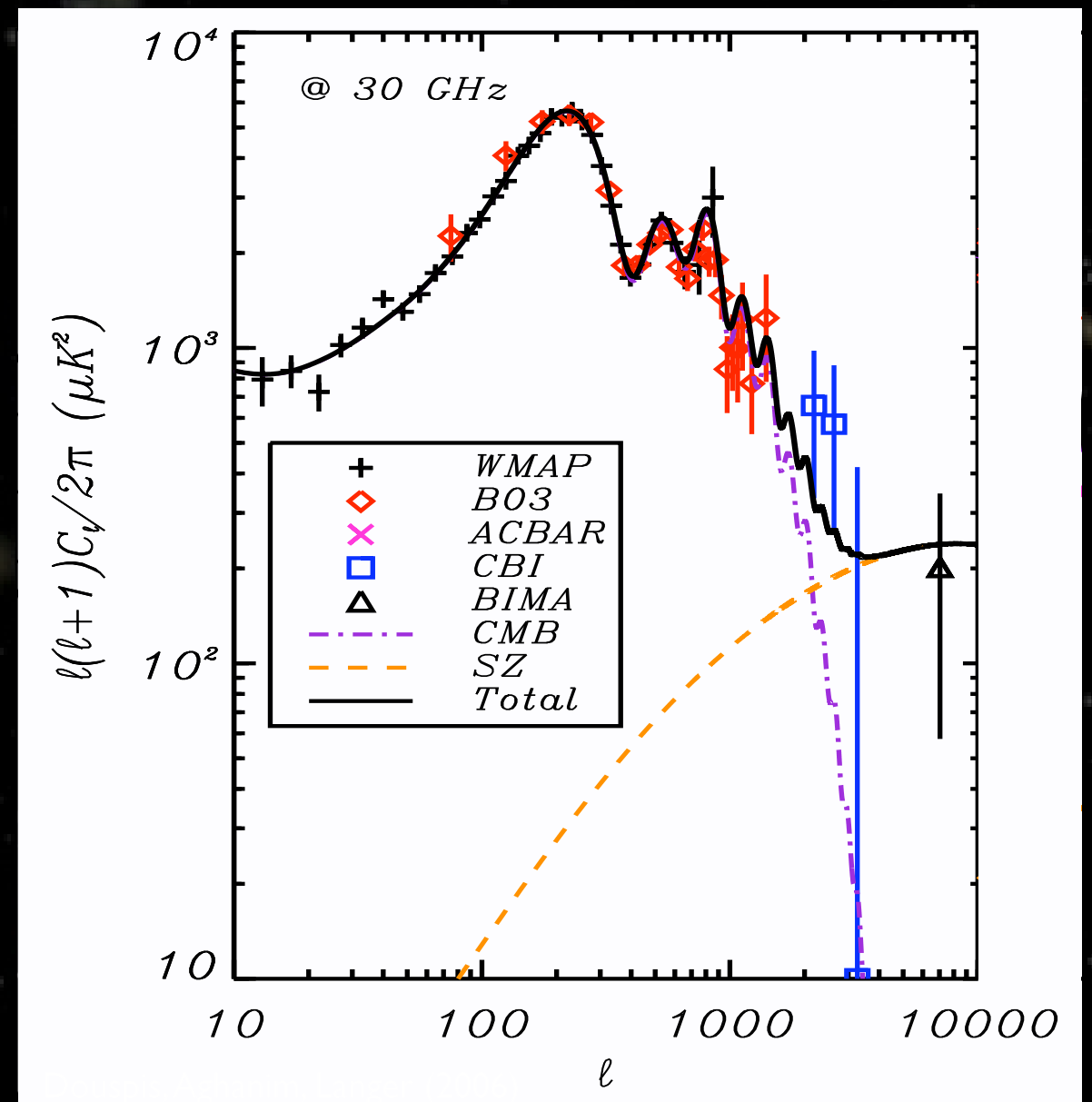
## indice spectral

- **Deux quantités importantes pour l'Univers primordial:**

- ★ Indice spectral  $n_s$ : pente «moyenne» de la courbe
- ★ Running de  $n_s$ : variation lente de la pente

- **À petite échelle angulaire:**

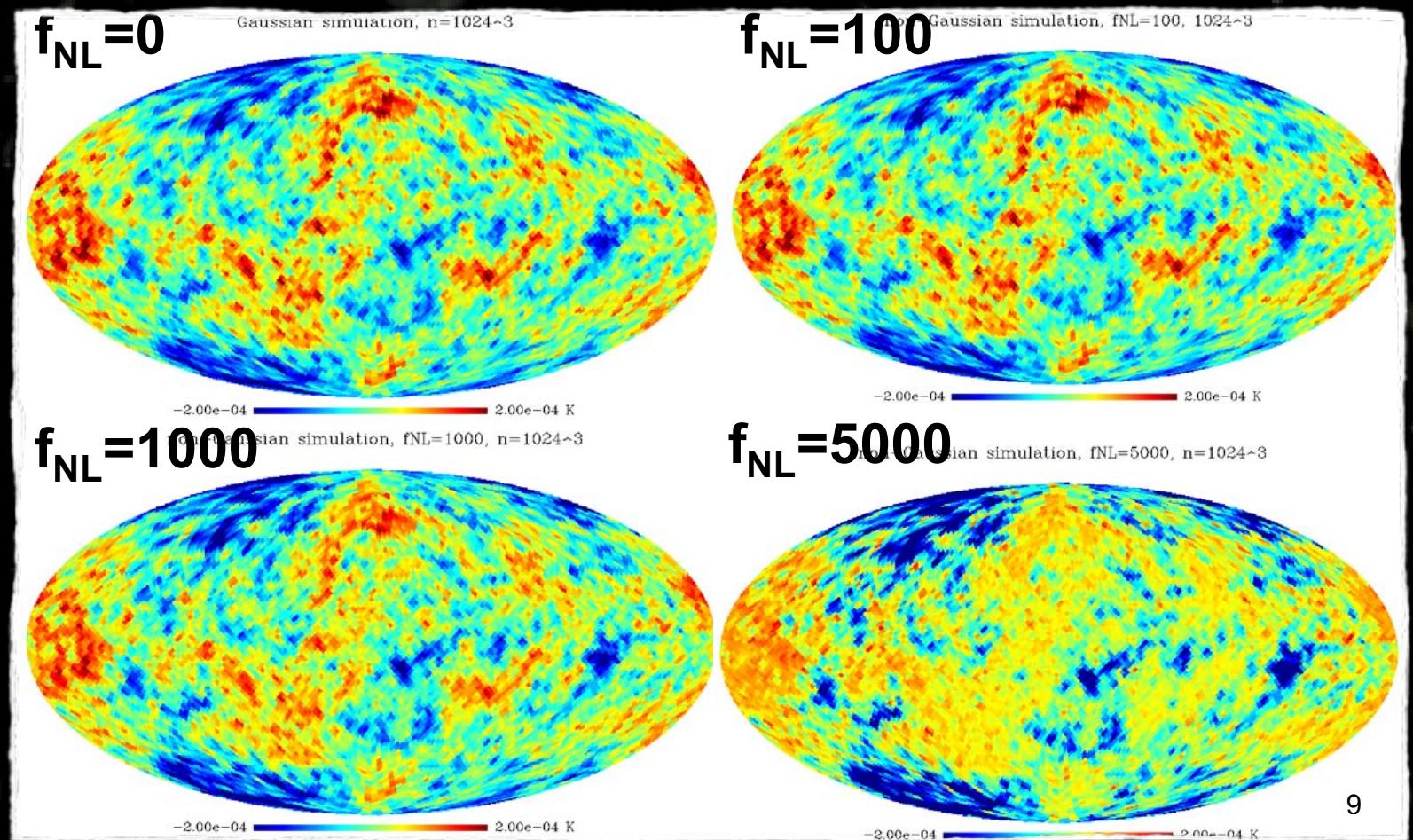
- ★ Meilleur bras de levier
- ★ Meilleure estimation des avant-plans (SZ, ...)



# Le CMB sous l'arcminute

## NON Gaussianités

- **Ecart à la Gaussianité** :  $\Phi(\vec{x}) = \Phi_L(\vec{x}) + f_{NL} [\Phi_L^2(\vec{x}) - \langle \Phi_L^2(\vec{x}) \rangle]$
- **Slow-Roll** :  $f_{NL} \sim 10^{-2}$
- **WMAP** :  $f_{NL} < 100$   
 $\Leftrightarrow$  le CMB est gaussien  
à 0.1% (95% C.L.)
- **Planck** :  $f_{NL} < 5$
- Le bruit ( $\sim$ gaussien) doit être négligeable aux échelles où on teste la NG



9

*Les modèles alternatifs à l'inflation la plus simple et les reste de transitions de phase primordiales prédisent un  $f_{NL}$  non négligeable (5-10)*

*e.g. Cordes Cosmiques aux plus fines échelles angulaires*

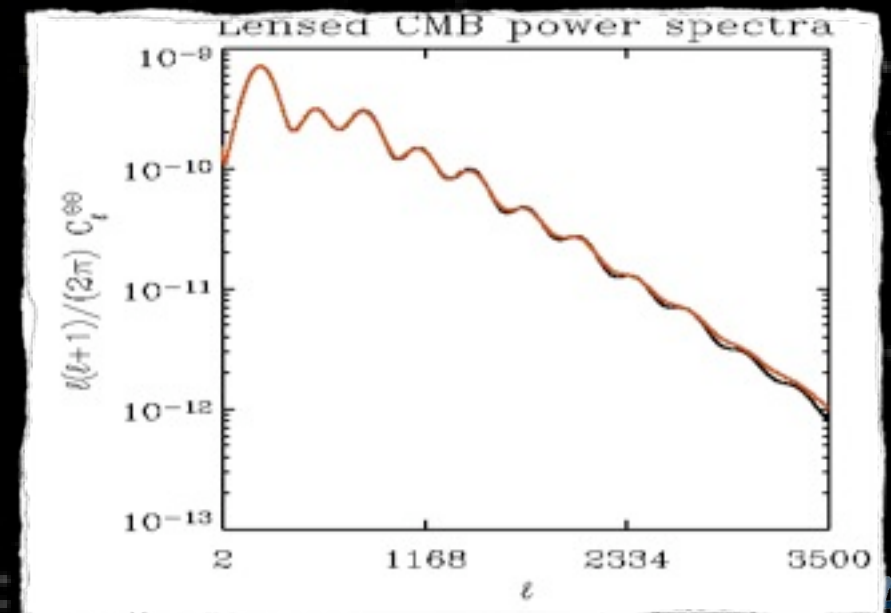
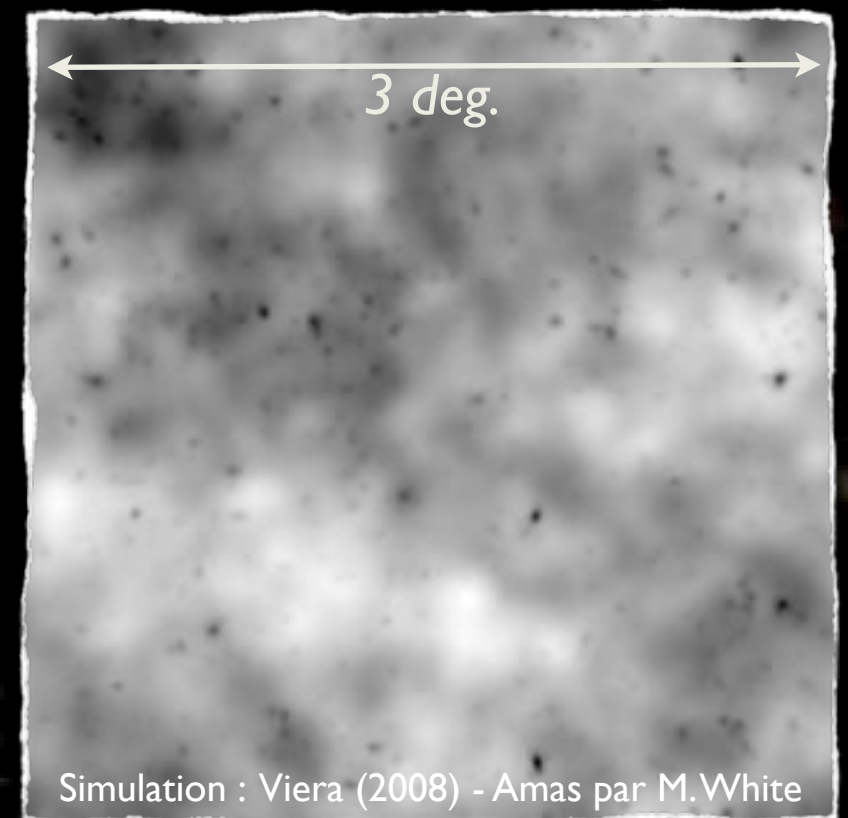




# Le CMB sous l'arcminute

## Anisotropies secondaires et Lentillage

- Le CMB est la lumière d'arrière-plan
- Tous les avant-plans à petite échelle apparaissent
  - ★ Amas SZ
  - ★ Galaxies
  - ★ Lentillage du CMB par les amas
- On peut alors mesurer l'Univers récent
  - ★ Énergie sombre via le comptage d'amas
  - ★ Énergie sombre à  $z=3-4$  (lensing)
  - ★ Masse des neutrinos (0.05 eV avec  $\sim 2$  arcmin)





# Conclusions

- «WMAP established the standard cosmological model, Planck will challenge it»  
[Ch. Lawrence]
  - ★ amélioration d'un facteur 3 à 10 sur les paramètres cosmologiques
  - ★ Une détection des modes tenseurs n'est pas exclue !
- La génération suivante d'instruments (sol, ballons, satellite) s'attaquera (s'attaque déjà) directement à l'Univers primordial
  - ★ Modes B de polarisation
    - Détection : Preuve de l'inflation, échelle en énergie
    - Mesure : caractérisation du potentiel de l'inflaton  $\Rightarrow$  théorie physique sous-jacente
  - ★ Fines échelles angulaires
    - Gaussianité, Lentillage, anisotropies secondaires (énergie sombre)
- De nouveaux concepts instruments sont nécessaires pour atteindre ces objectifs
- La nature a été très généreuse en nous offrant le CMB qui fournit une telle moisson d'informations d'une grande pureté sur l'Univers et la physique fondamentale



# COSMOLOGY MARCHES ON

