

BRAIN :

*un interféromètre bolométrique
pour la quête des modes-B*



Jean-Christophe Hamilton
APC - Paris



Au menu ...

- *Quelques rappels de cosmologie*
- *L'inflation et les modes B*
- *L'interférométrie bolométrique*
- *BRAIN et le site du Dôme C*



Quelques rappels de cosmologie

- Les galaxies sont décalées vers le rouge : redshift z
- d'autant plus qu'elles sont lointaines

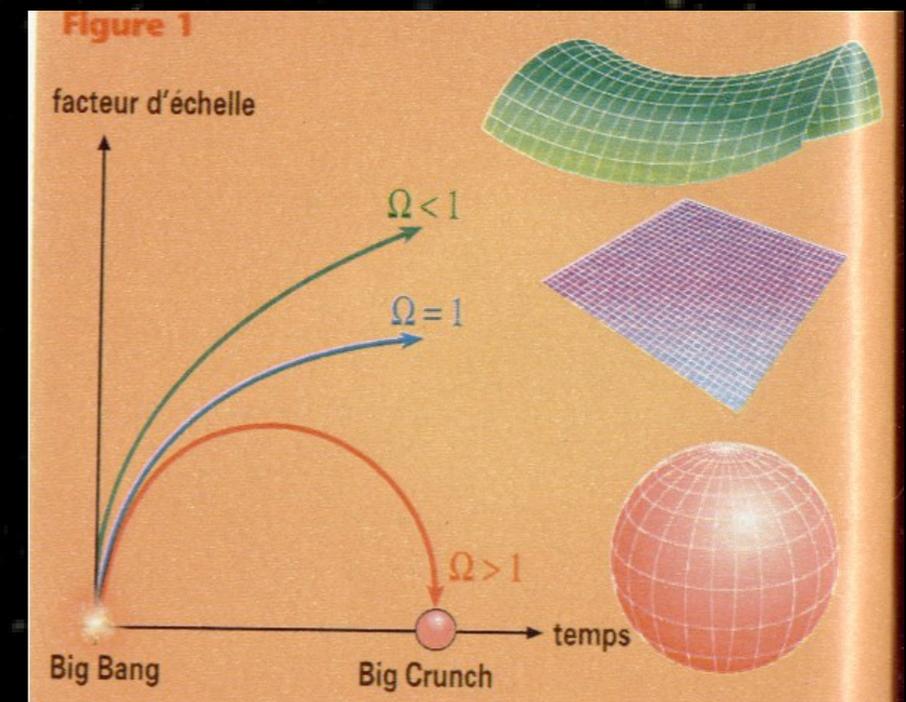
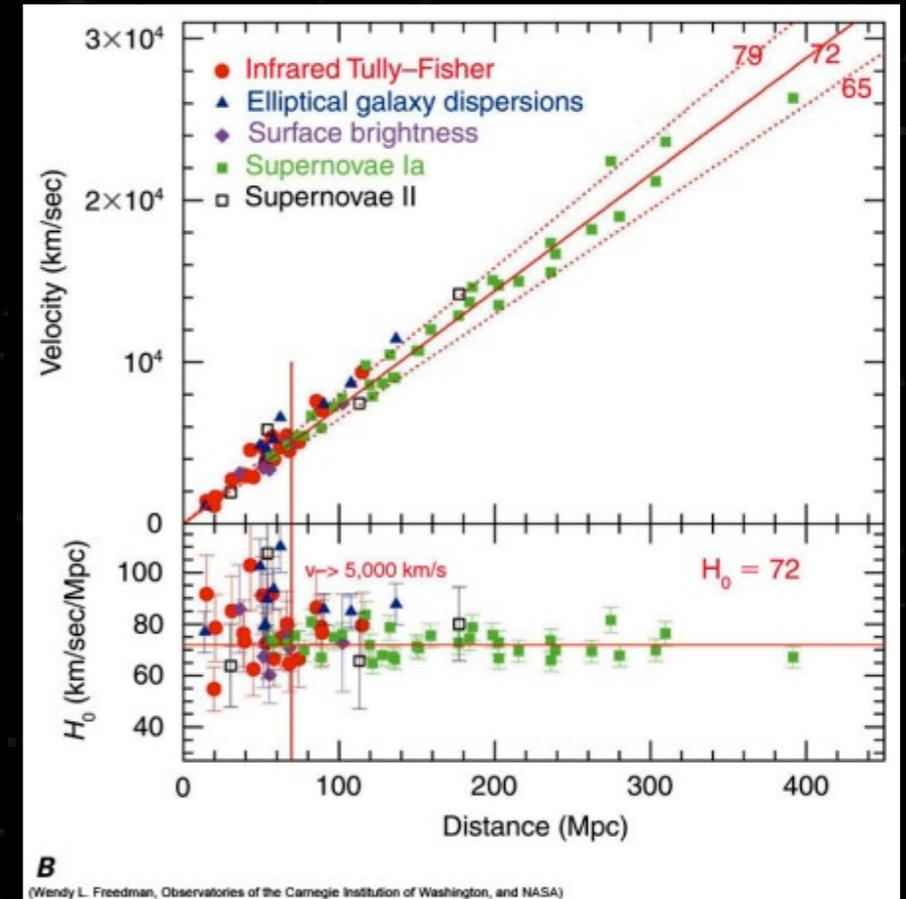
- *l'Univers est en expansion*

- Paramètre de Hubble

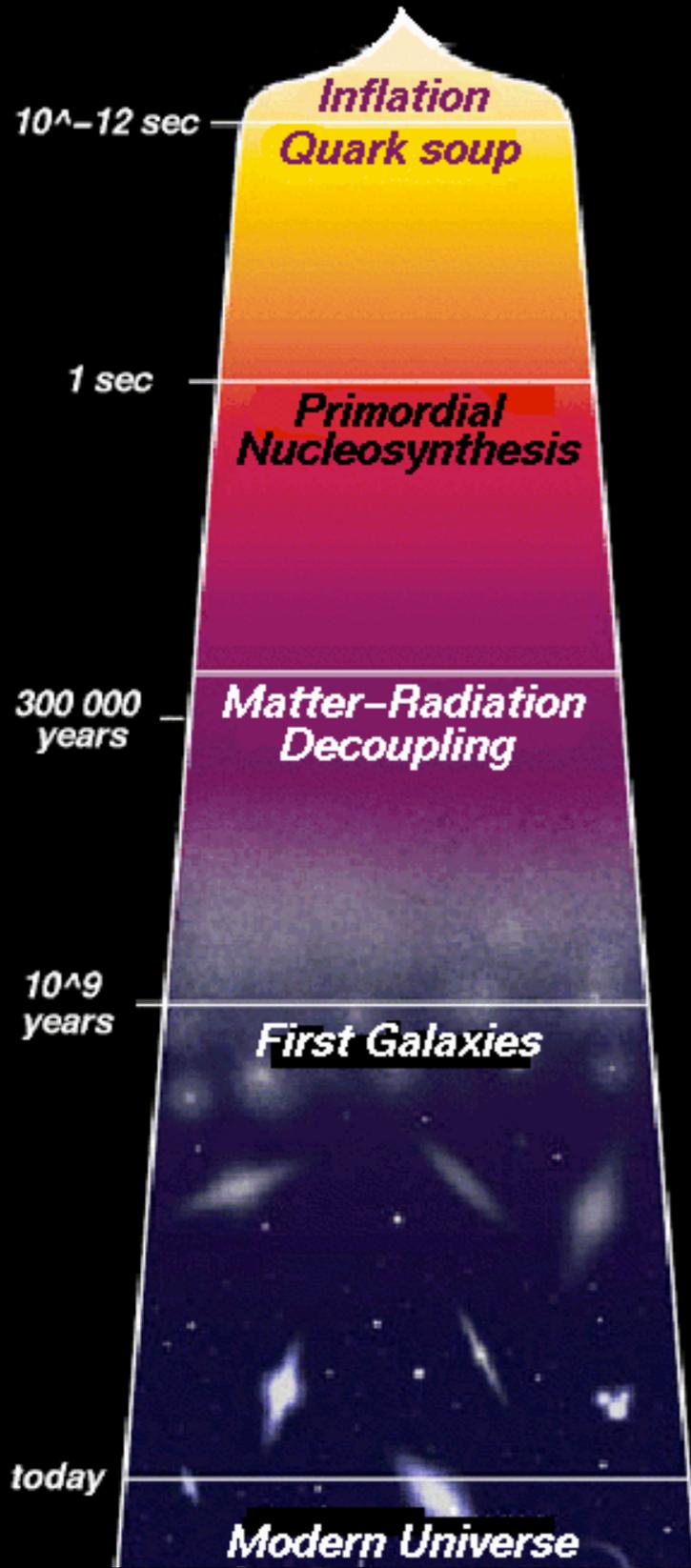
$$H^2(z) = H_0^2 \times [\Omega_k(1+z)^2 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_x(1+z)^{3+3w}]$$

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_k$$

- À grand z on regarde le passé, plus dense et plus chaud : Big-Bang



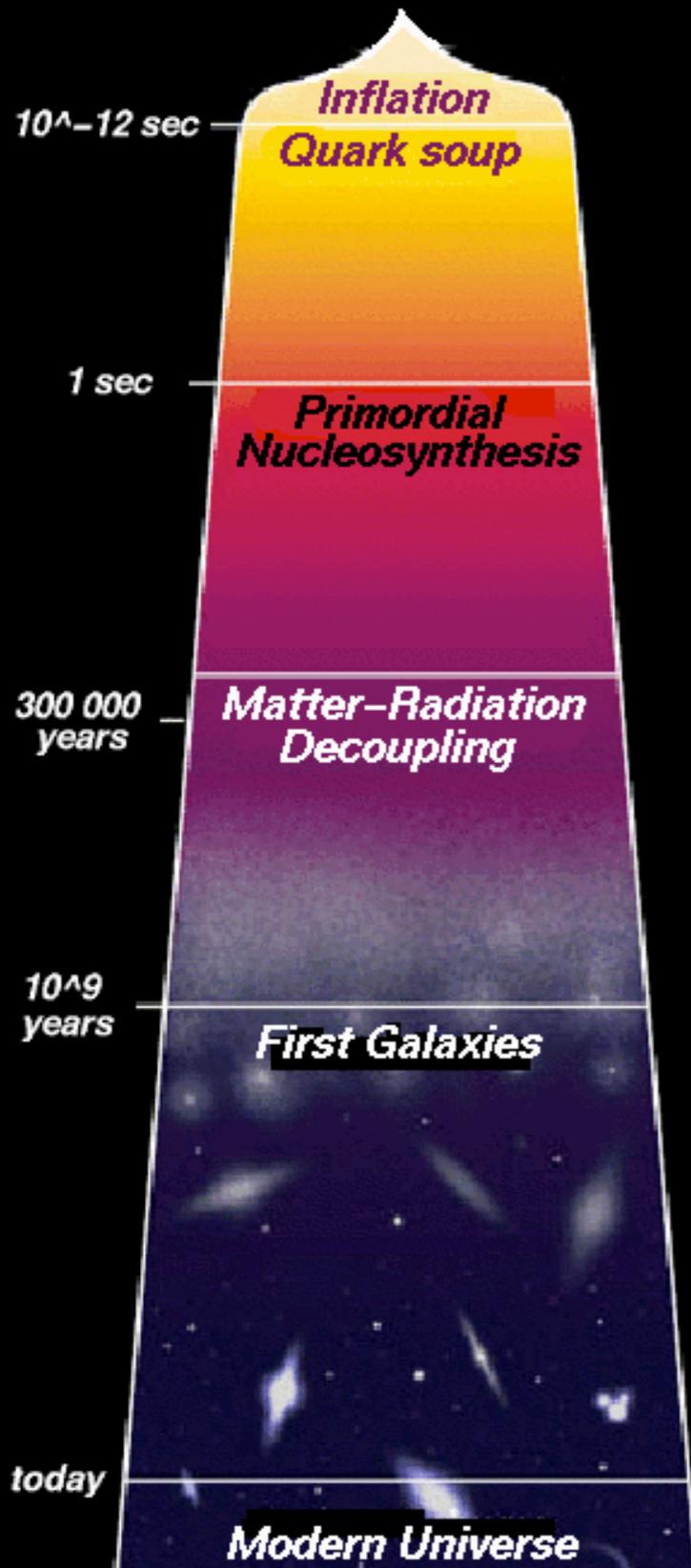
BIG-BANG



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

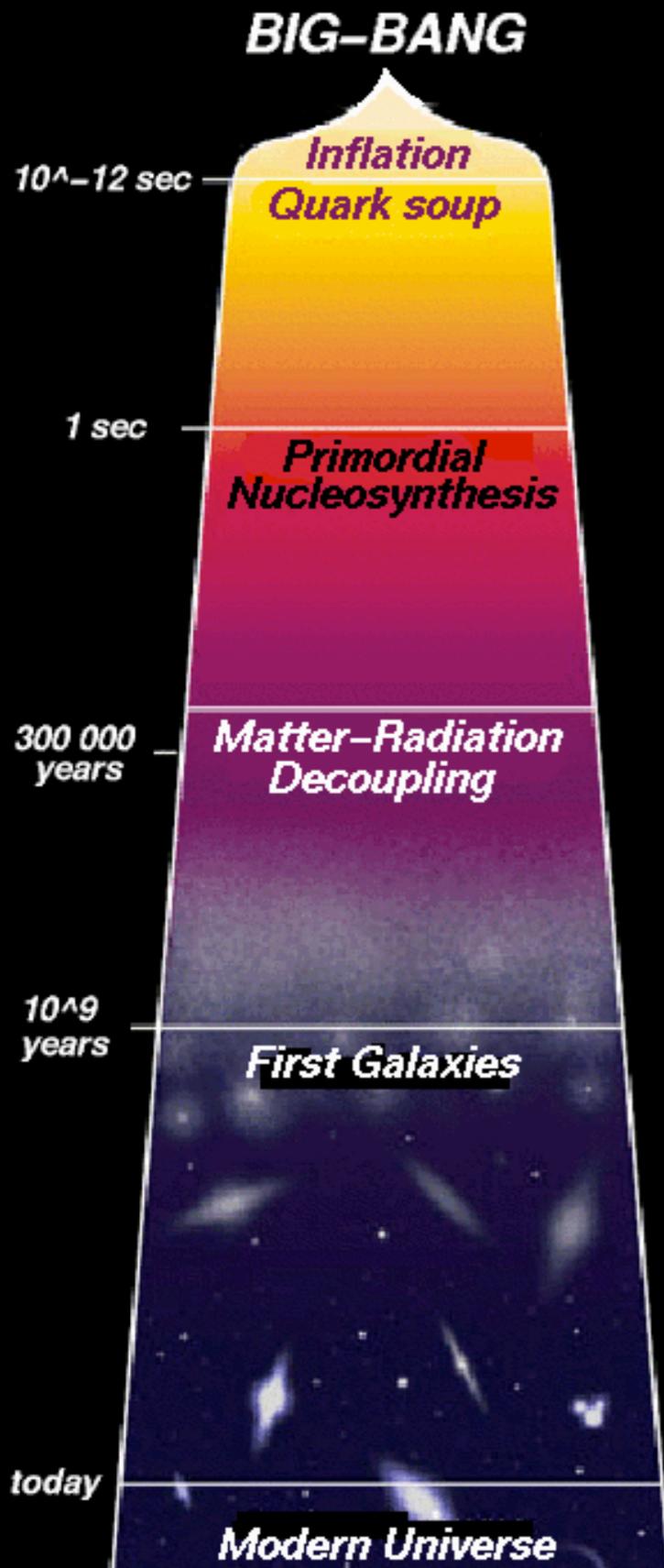


BIG-BANG



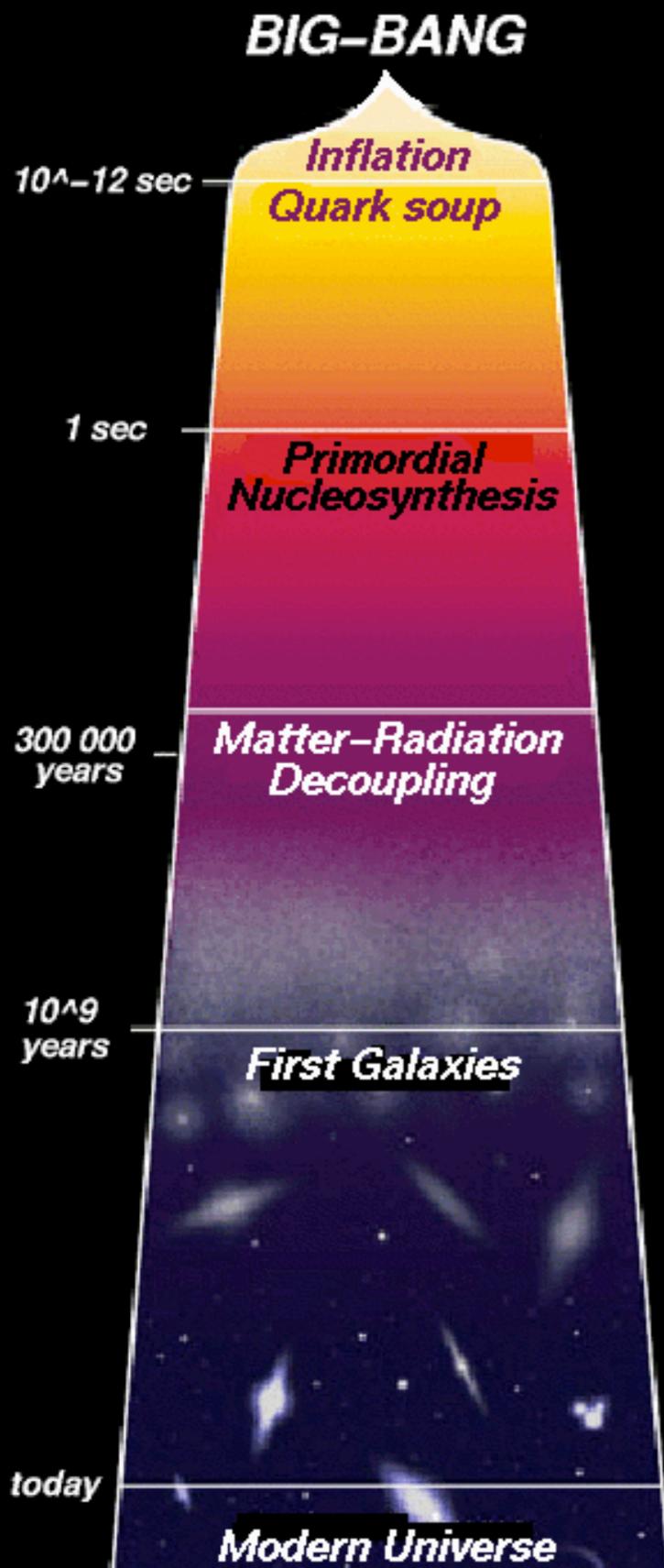
- *Singularité initiale ?*
 - Non décrite dans les théories actuelles
 - Supercordes ?
- *Inflation*
 - L'univers enfle démesurément





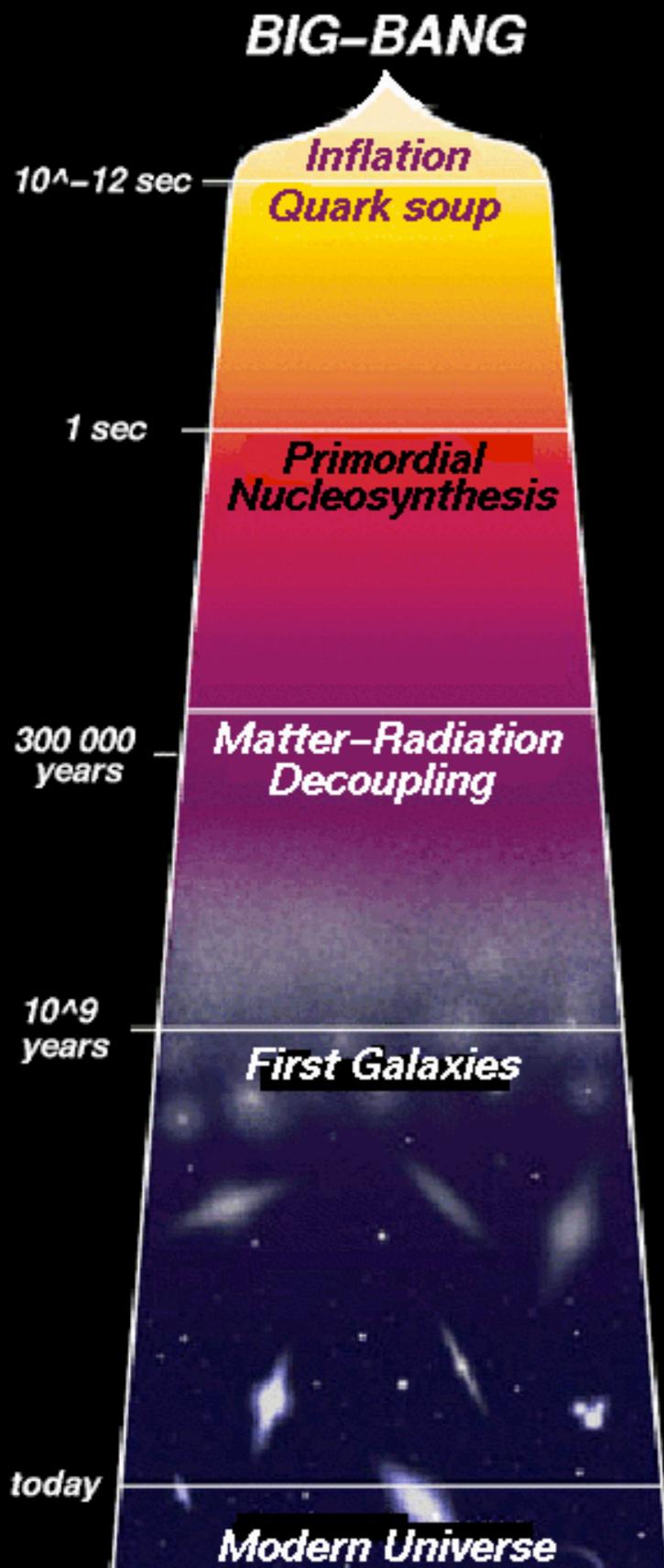
- *Singularité initiale ?*
 - Non décrite dans les théories actuelles
 - Supercordes ?
- *Inflation*
 - L'univers enfle démesurément
- *Nucléosynthèse primordiale*
 - Formation des premiers atomes H, He, Li, Be
 - Univers toujours totalement ionisé
 - Matière et rayonnement à l'équilibre thermodynamique





- *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
- *$T < 13.6$ eV : les noyaux capturent les électrons*



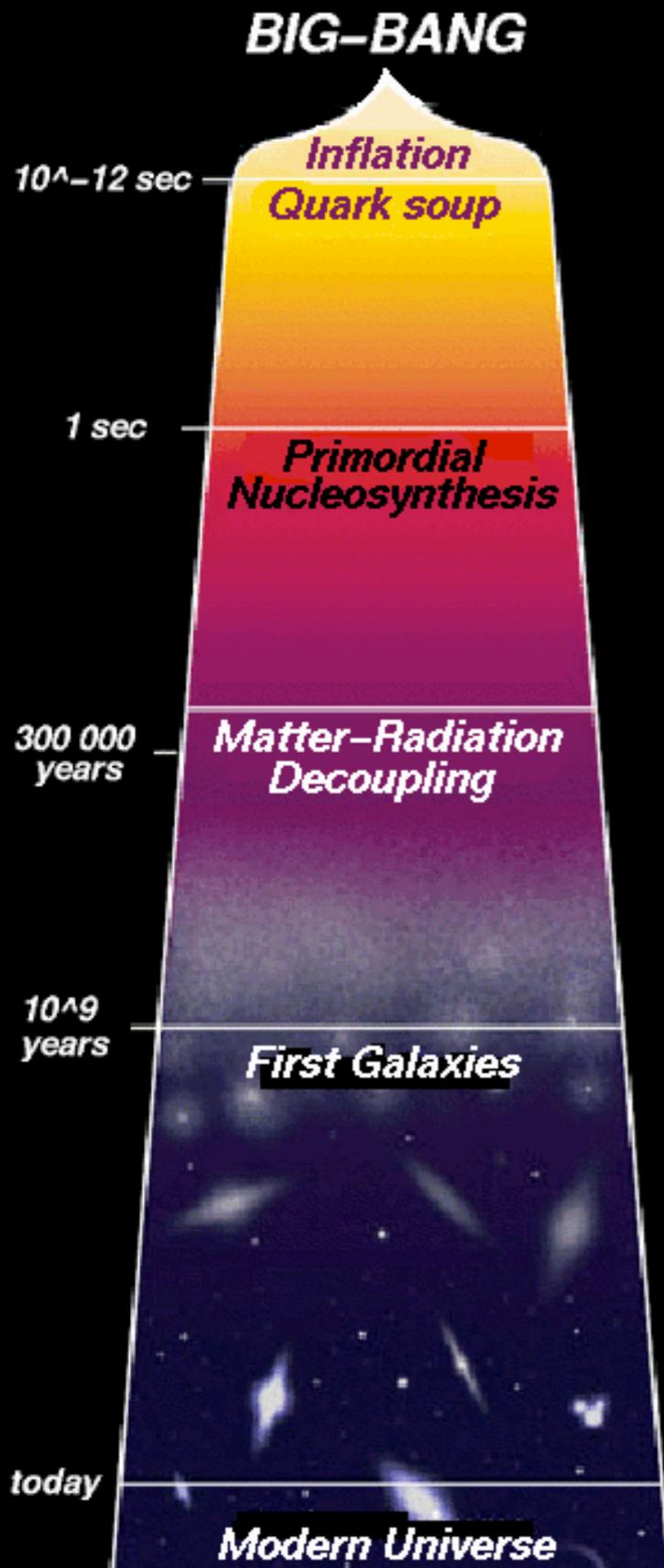


- *Singularité initiale ?*
 - Non décrite dans les théories actuelles
 - Supercordes ?
- *Inflation*
 - L'univers enfle démesurément
- *Nucléosynthèse primordiale*
 - Formation des premiers atomes H, He, Li, Be
 - Univers toujours totalement ionisé
 - Matière et rayonnement à l'équilibre thermodynamique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



Photons découplés de la matière
Emission du CMB
 $T=3000$ K
 $z=1000$





- *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*

↓

Photons découplés de la matière

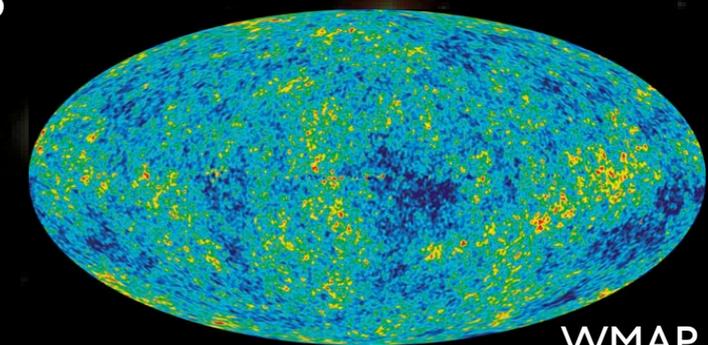
Emission du CMB

$T=3000$ K

$z=1000$

↓

Aujourd'hui : $T=2.7$ K



Les paramètres cosmologiques

- *Constante de Hubble*

- Taux d'expansion $H_0 = 71 \pm 4 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$

$$H^2(z) = H_0^2 \times [\Omega_k(1+z)^2 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_x(1+z)^{3+3w}]$$

- *Densité* $\Omega_{\text{tot}} = 1.003^{+0.013}_{-0.017}$

- Énergie sombre $\Omega_\Lambda = 0.76^{+0.04}_{-0.06}$
- Matière noire $\Omega_{\text{dm}} = 0.20^{+0.02}_{-0.04}$
- Matière Baryonique $\Omega_b = 0.042^{+0.003}_{-0.005}$

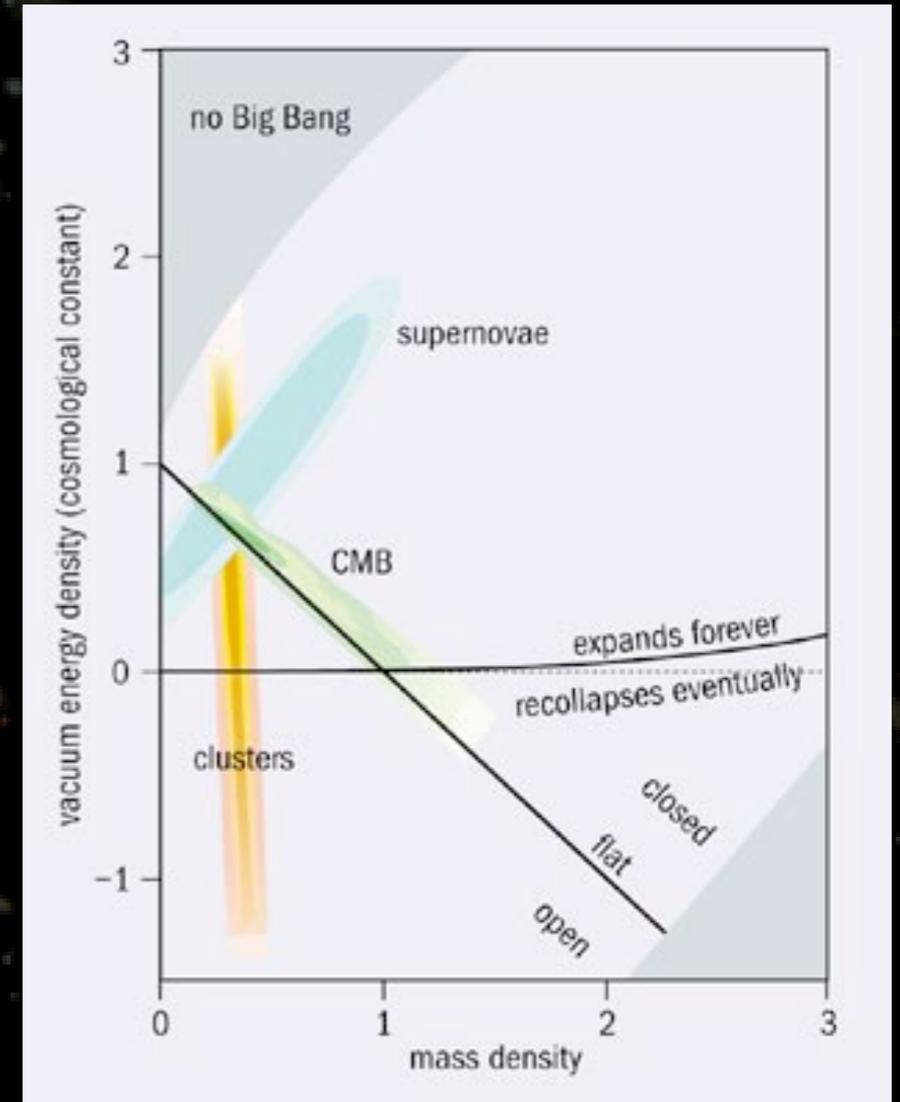
- *Univers primordial*

- Indice spectral des fluctuations
- rapport tenseur/scalaire



Les paramètres cosmologiques

- *Constante de Hubble*
 - Taux d'expansion $H_0 = 71 \pm 4 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$
 $H^2(z) = H_0^2 \times [\Omega_k(1+z)^2 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_x(1+z)^{3+3w}]$
- *Densité* $\Omega_{\text{tot}} = 1.003^{+0.013}_{-0.017}$
 - Énergie sombre $\Omega_\Lambda = 0.76^{+0.04}_{-0.06}$
 - Matière noire $\Omega_{\text{dm}} = 0.20^{+0.02}_{-0.04}$
 - Matière Baryonique $\Omega_b = 0.042^{+0.003}_{-0.005}$
- *Univers primordial*
 - Indice spectral des fluctuations
 - rapport tenseur/scalaire



Les paramètres cosmologiques

- *Constante de Hubble*

- Taux d'expansion $H_0 = 71 \pm 4 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$

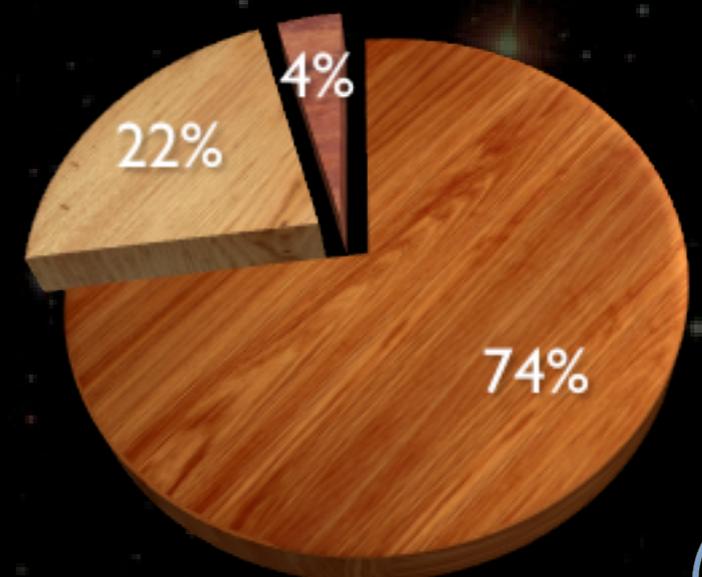
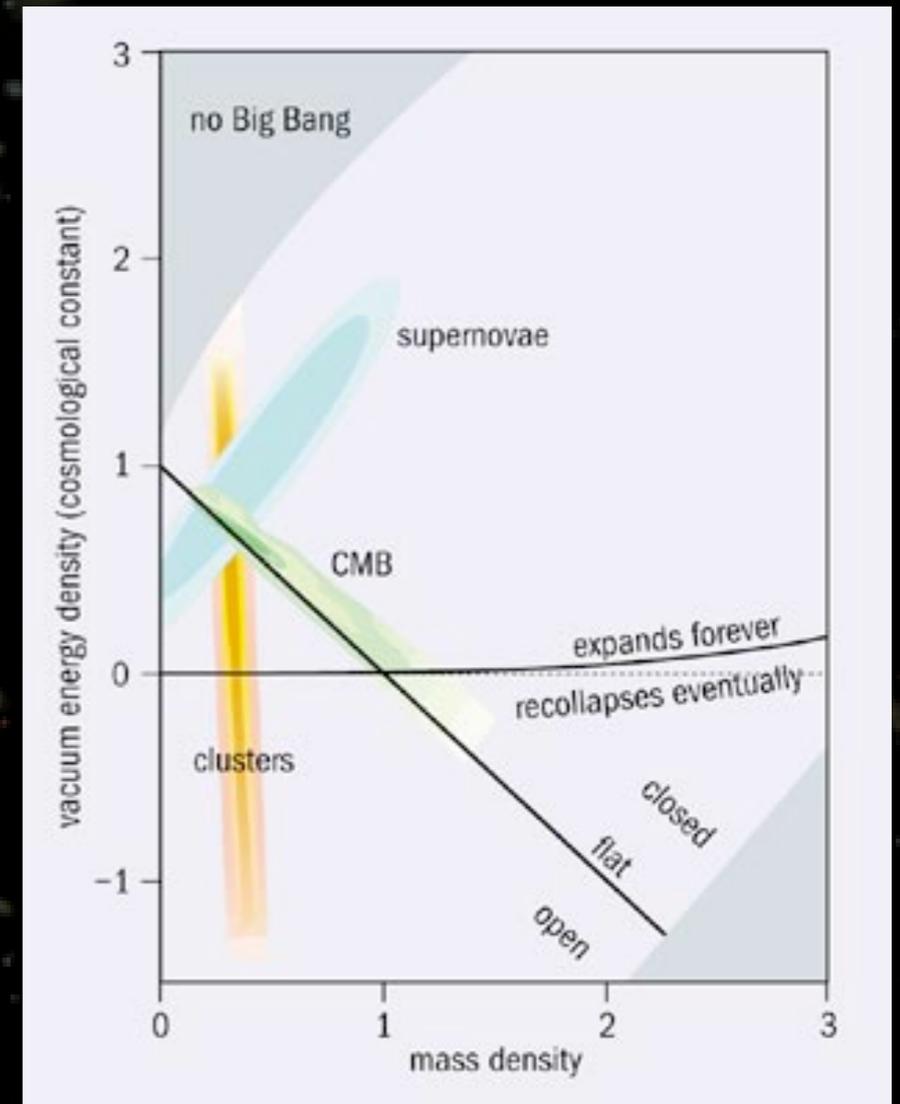
$$H^2(z) = H_0^2 \times [\Omega_k(1+z)^2 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_x(1+z)^{3+3w}]$$

- *Densité* $\Omega_{\text{tot}} = 1.003^{+0.013}_{-0.017}$

- Énergie sombre $\Omega_\Lambda = 0.76^{+0.04}_{-0.06}$
- Matière noire $\Omega_{\text{dm}} = 0.20^{+0.02}_{-0.04}$
- Matière Baryonique $\Omega_b = 0.042^{+0.003}_{-0.005}$

- *Univers primordial*

- Indice spectral des fluctuations
- rapport tenseur/scalaire



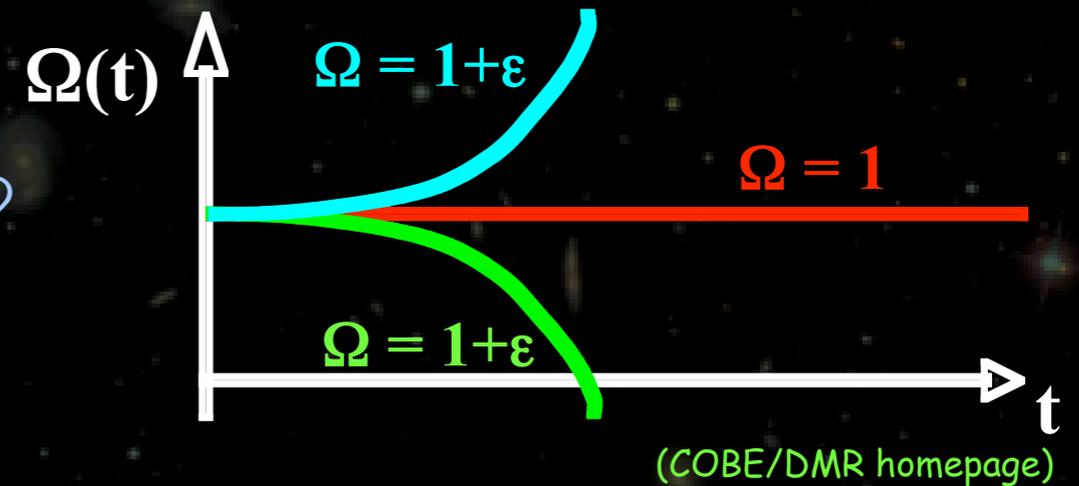
En résumé

- *L'Univers est en expansion accélérée*
 - Constante de Hubble
 - Énergie sombre ? Constante Cosmologique ?
- *L'Univers est plat*
 - Fond diffus cosmologique (CMB)
- *Il contient de la matière noire*
 - SuSy ?

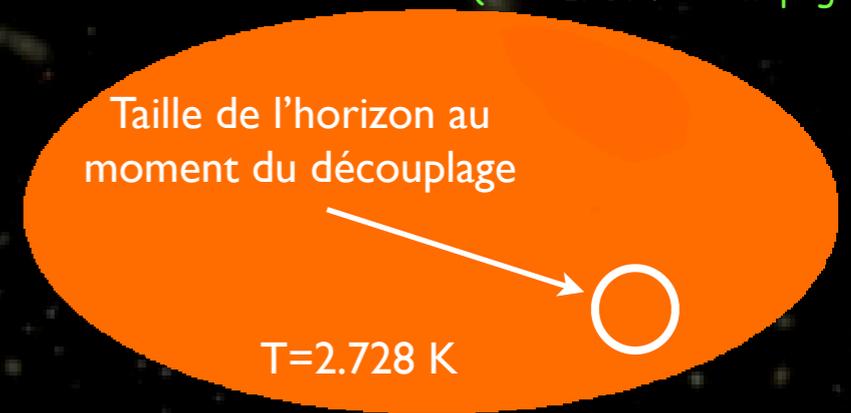


Ce que n'explique pas le Big-Bang

- Pourquoi l'Univers est-il si plat ?



- Pourquoi le CMB est-il si isotrope ?

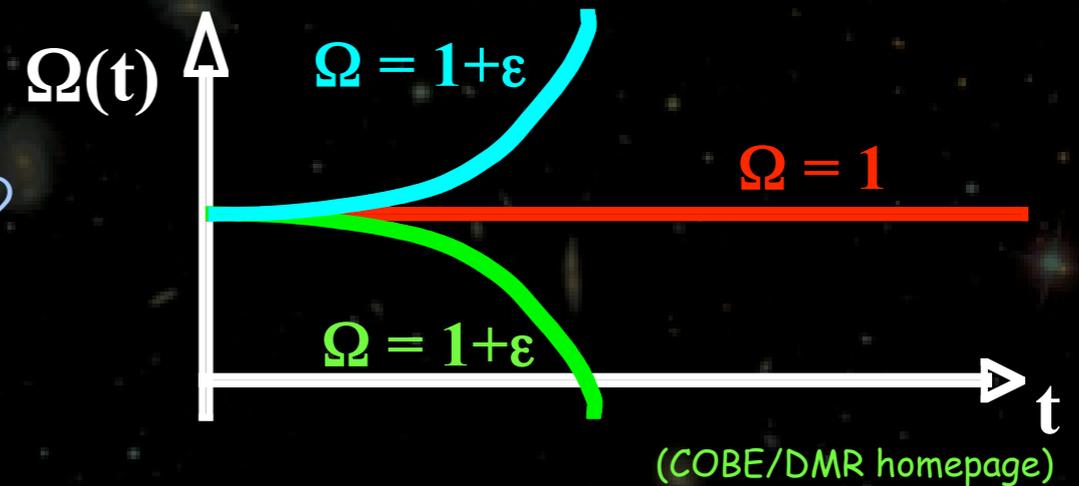


- D'où viennent les galaxies ?



Ce que n'explique pas le Big-Bang

- Pourquoi l'Univers est-il si plat ?
- Pourquoi le CMB est-il si isotrope ?
- D'où viennent les galaxies ?



Taille de l'horizon au moment du découplage

$T = 2.728 \text{ K}$

S. Colombi (IAP)

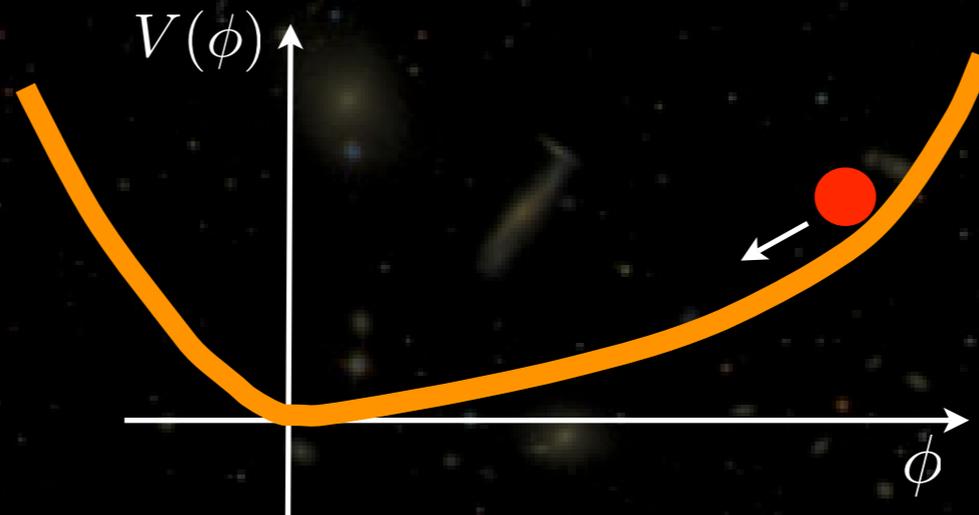


Solution séduisante : l'inflation

- *Période brève de l'univers primordial:*
 - un champ scalaire (l'inflaton) domine
 - il "roule lentement"



A. Linde



A. Guth

- *Expansion rapide et accélérée si $V(\phi) \neq 0$*
- *L'inflation cesse quand le potentiel devient nul.*
- *L'inflaton se désintègre en particules*

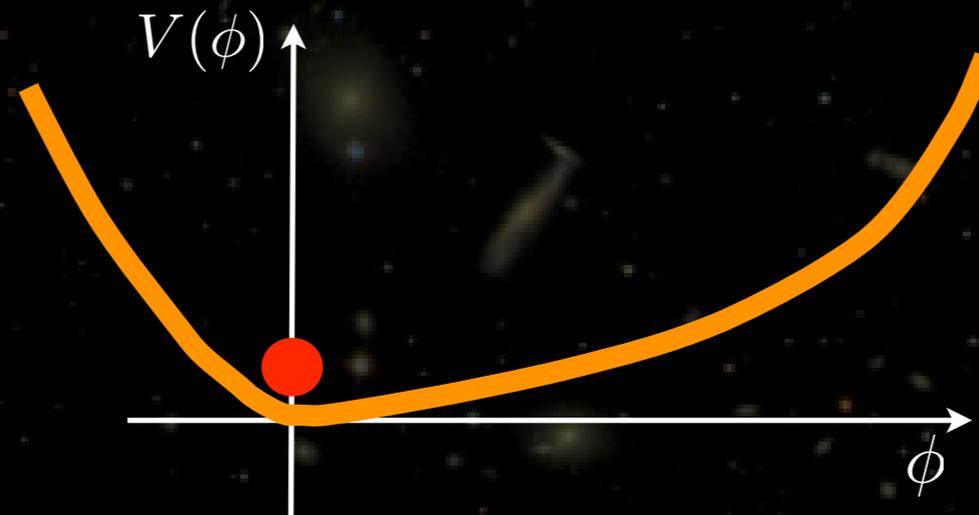


Solution séduisante : l'inflation

- *Période brève de l'univers primordial:*
 - un champ scalaire (l'inflaton) domine
 - il "roule lentement"



A. Linde



A. Guth

- *Expansion rapide et accélérée si $V(\phi) \neq 0$*
- *L'inflation cesse quand le potentiel devient nul.*
- *L'inflaton se désintègre en particules*



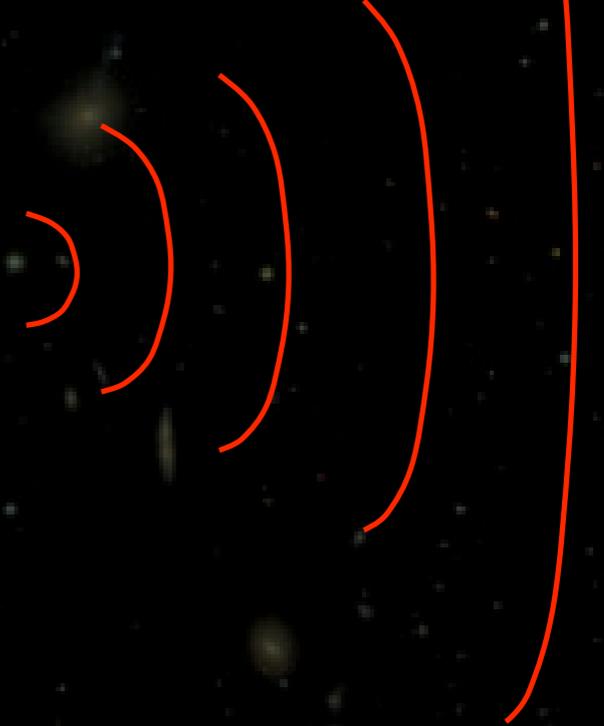
Les effets de l'inflation

- *L'univers enfle démesurément :*
 - Courbure quasi-nulle à la fin de l'inflation
- *Des régions apparemment déconnectées étaient en fait à l'équilibre avant l'inflation*
 - Homogénéité de l'Univers à grande échelle
- *Les fluctuations quantiques sont "grossières" par l'inflation et donnent des fluctuations macroscopiques dont on peut prédire la forme*
 - Génération de graines pour la formation des structures



Les effets de l'inflation

- *L'univers enfle démesurément :*
 - Courbure quasi-nulle à la fin de l'inflation
- *Des régions apparemment déconnectées étaient en fait à l'équilibre avant l'inflation*
 - Homogénéité de l'Univers à grande échelle
- *Les fluctuations quantiques sont "grossières" par l'inflation et donnent des fluctuations macroscopiques dont on peut prédire la forme*
 - Génération de graines pour la formation des structures



Les effets de l'inflation

- L'univers enfla démesurément :

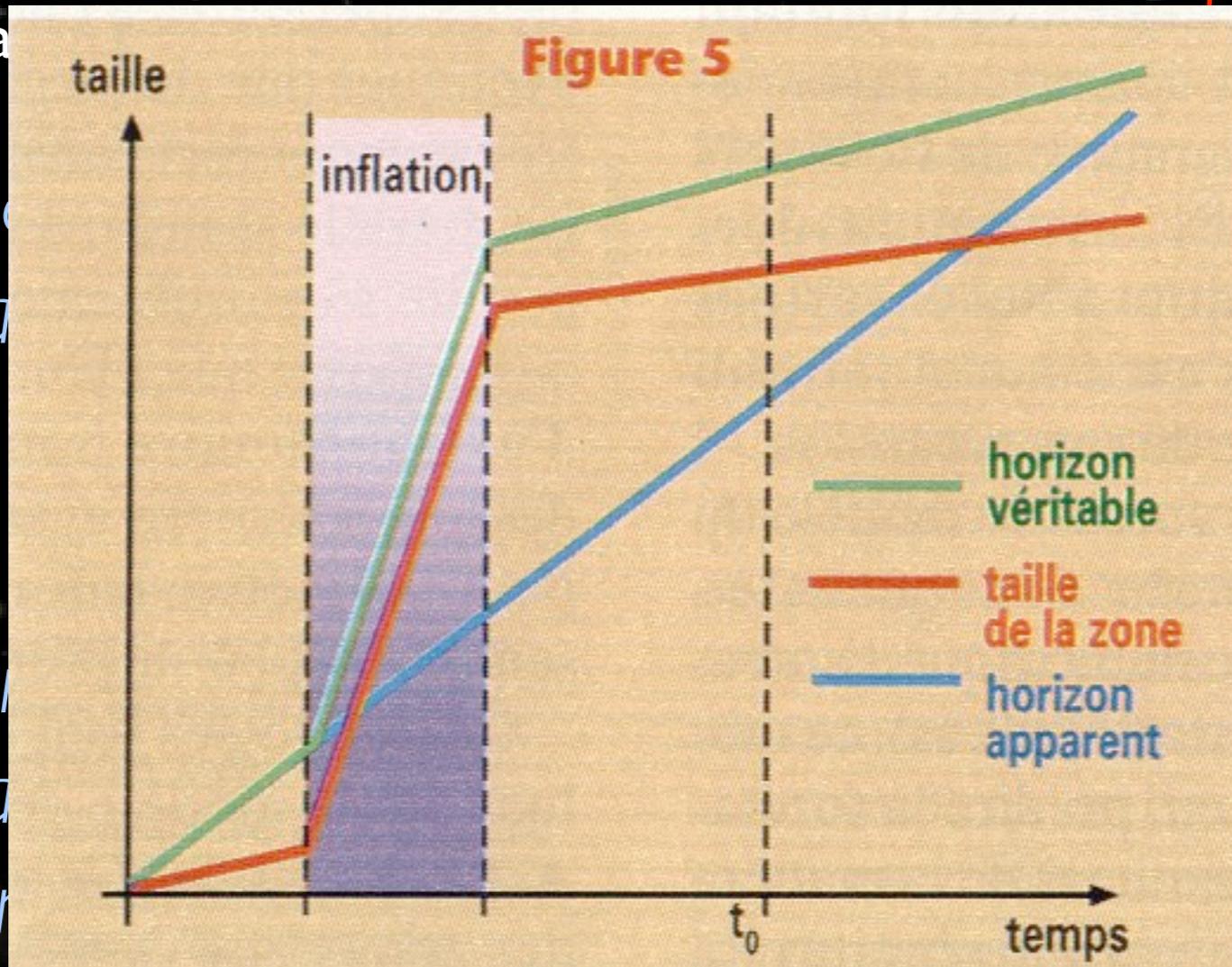
- Courbure quasi nulle

- Des régions qui étaient en fait en contact avant l'inflation

- Homogénéité et isotropie

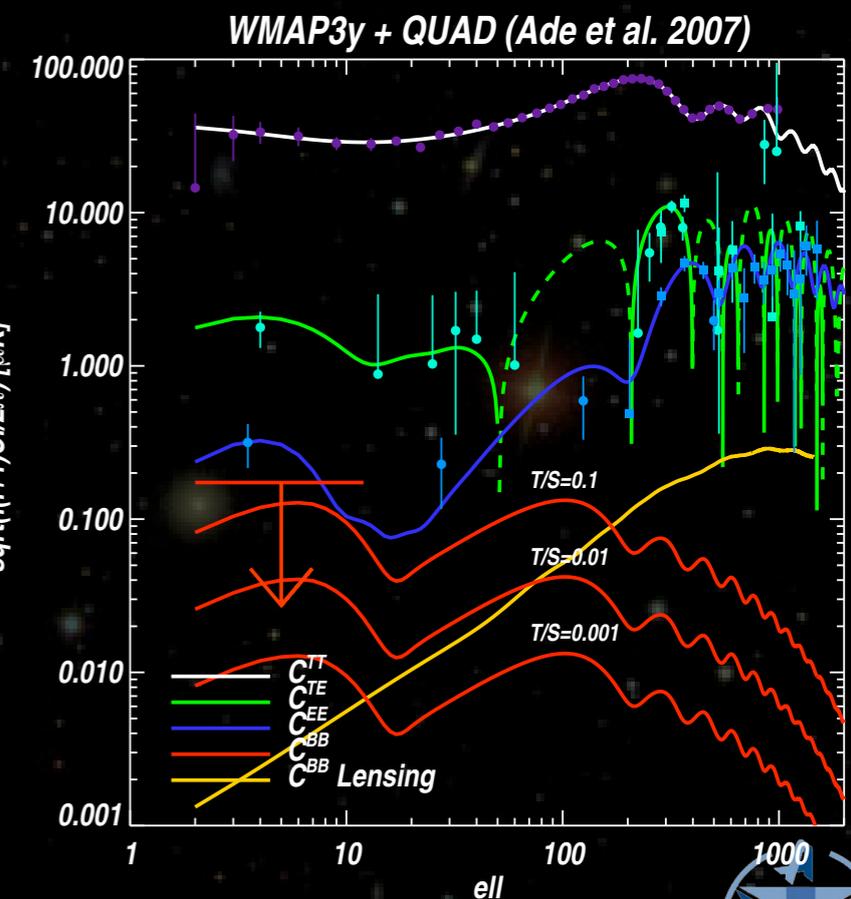
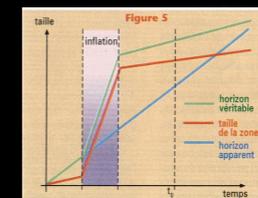
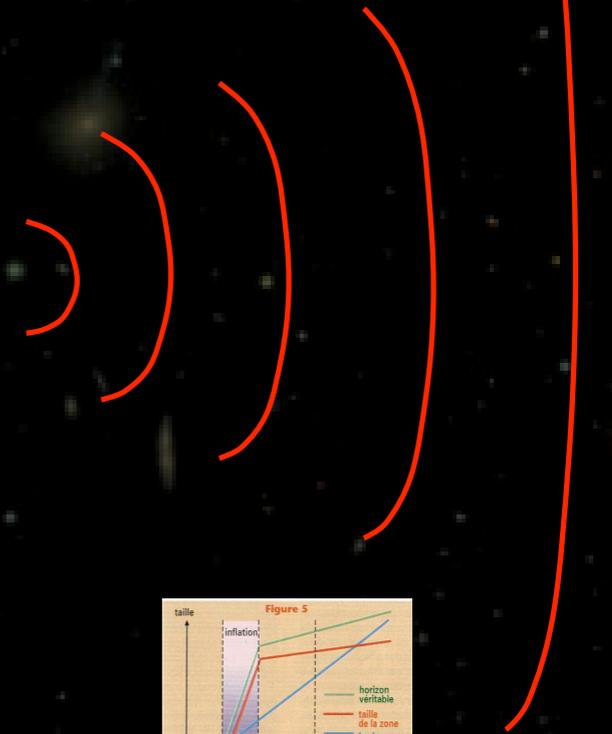
- Les fluctuations "grossières" par rapport aux fluctuations microscopiques ne peuvent pas prédire la forme

- Génération de graines pour la formation des structures



Les effets de l'inflation

- *L'univers enfle démesurément :*
 - Courbure quasi-nulle à la fin de l'inflation
- *Des régions apparemment déconnectées étaient en fait à l'équilibre avant l'inflation*
 - Homogénéité de l'Univers à grande échelle
- *Les fluctuations quantiques sont "grossières" par l'inflation et donnent des fluctuations macroscopiques dont on peut prédire la forme*
 - Génération de graines pour la formation des structures



Comment tester l'inflation ?

- *Comparer les structures observées et les fluctuations primordiales prédites*
 - Les fluctuations se sont condensées et ont évolué pour former les structures (galaxies, amas)
 - On doit pouvoir observer ces fluctuations de densité dans le CMB comme des fluctuations de température
 - Leur forme doit être caractéristique de l'inflation



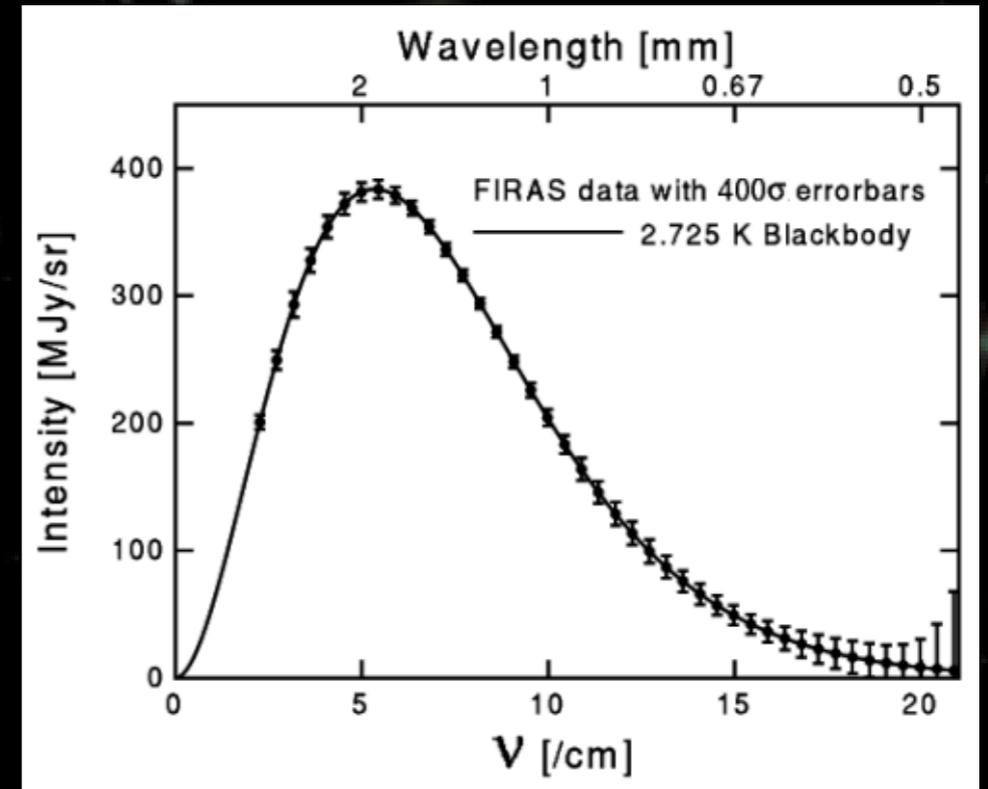
Le fond diffus cosmologique (CMB)

- *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/cm³
 - Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- *Prix Nobel :*
 - 1978 : Penzias & Wilson
 - 2006 : Smoot & Mather : COBE

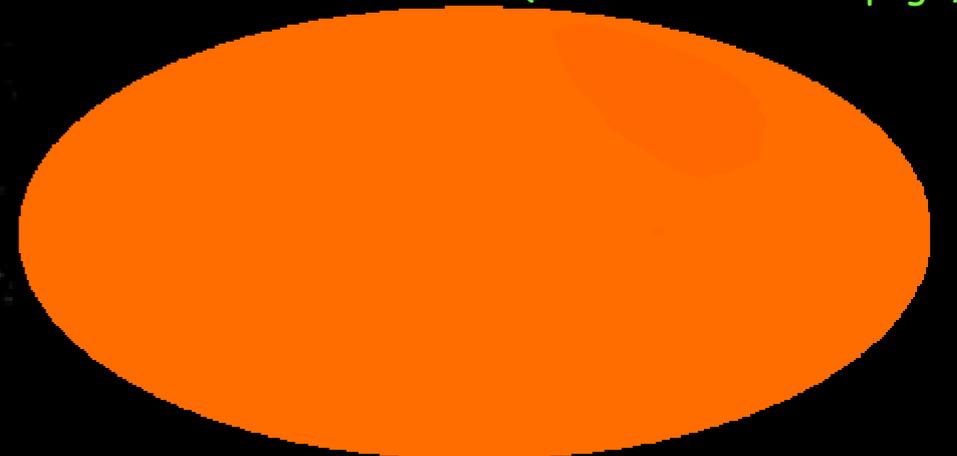


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- *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/cm³
 - Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- *Prix Nobel :*
 - 1978 : Penzias & Wilson
 - 2006 : Smoot & Mather : COBE

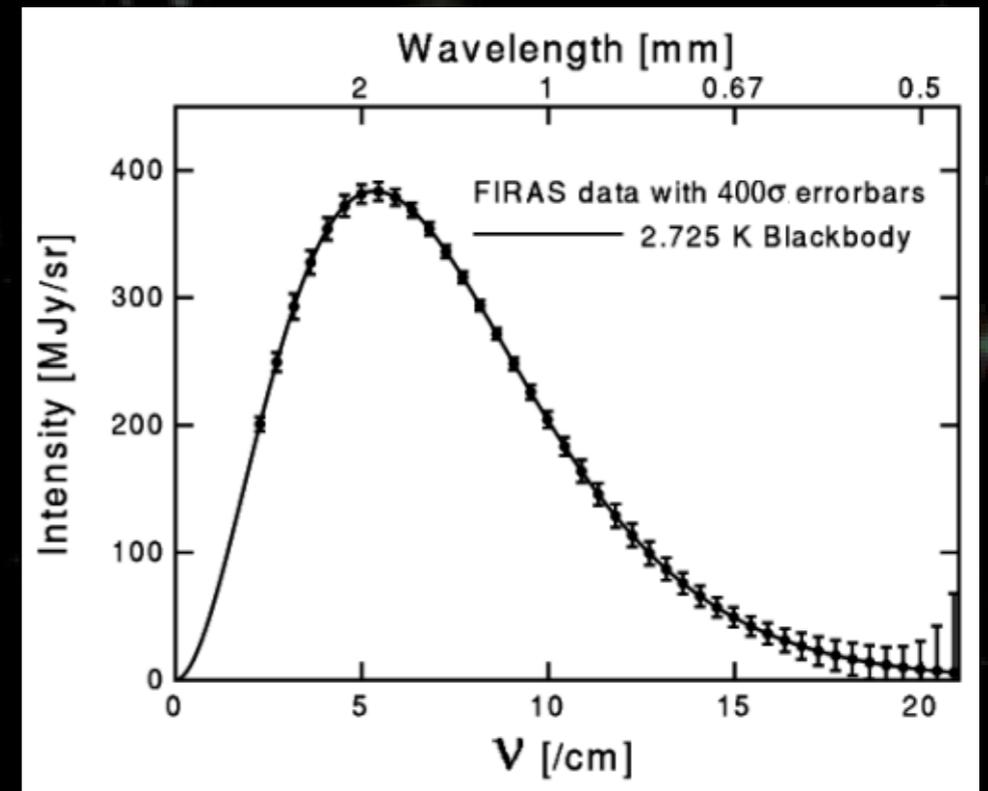


(COBE/DMR homepage)

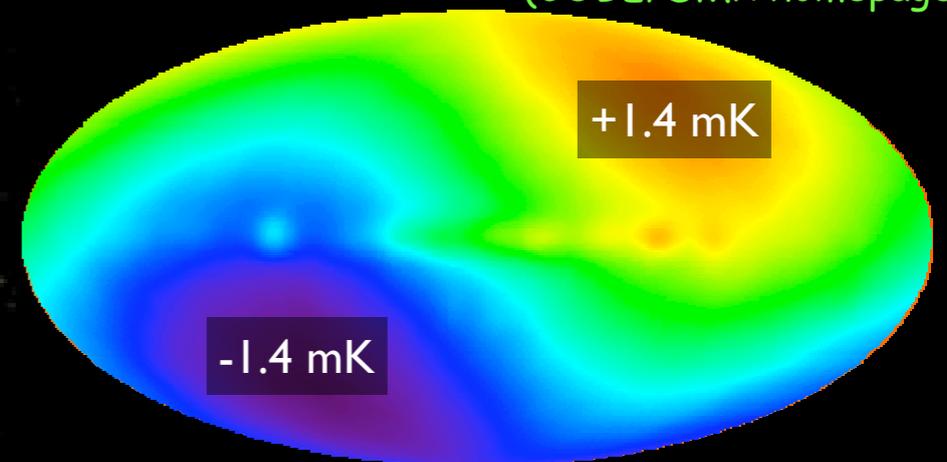


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- *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/cm³
 - Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- *Prix Nobel :*
 - 1978 : Penzias & Wilson
 - 2006 : Smoot & Mather : COBE

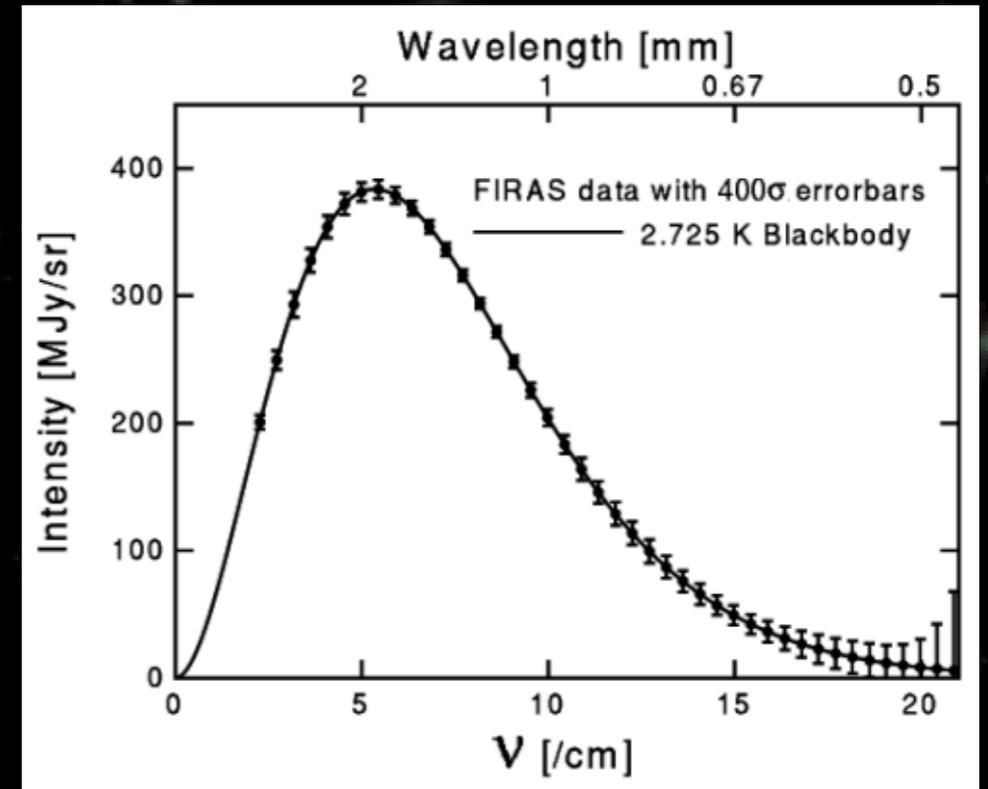


(COBE/DMR homepage)

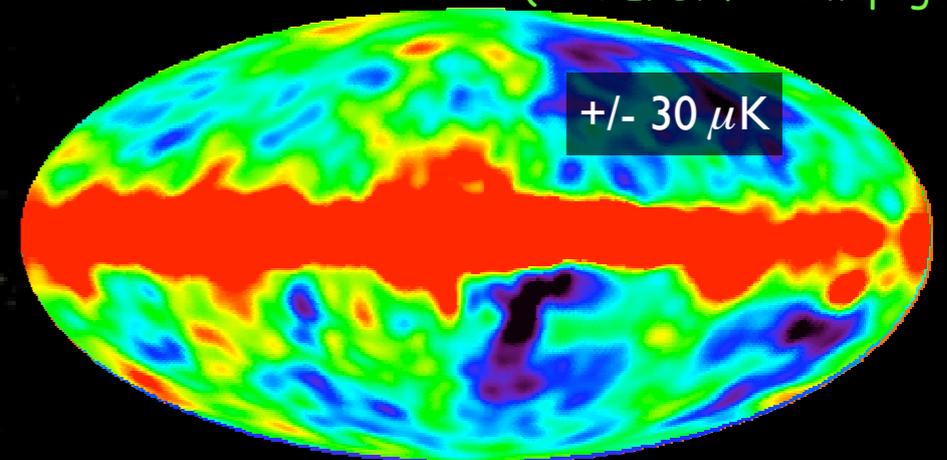


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- *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/cm³
 - Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- *Prix Nobel :*
 - 1978 : Penzias & Wilson
 - 2006 : Smoot & Mather : COBE



(COBE/DMR homepage)



Le fond diffus cosmologique (CMB)



The Nobel Prize in Physics 2006

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"



Photo: P. Izzo

John C. Mather

1/2 of the prize

USA

NASA Goddard Space
Flight Center
Greenbelt, MD, USA

b. 1946



Photo: J. Bauer

George F. Smoot

1/2 of the prize

USA

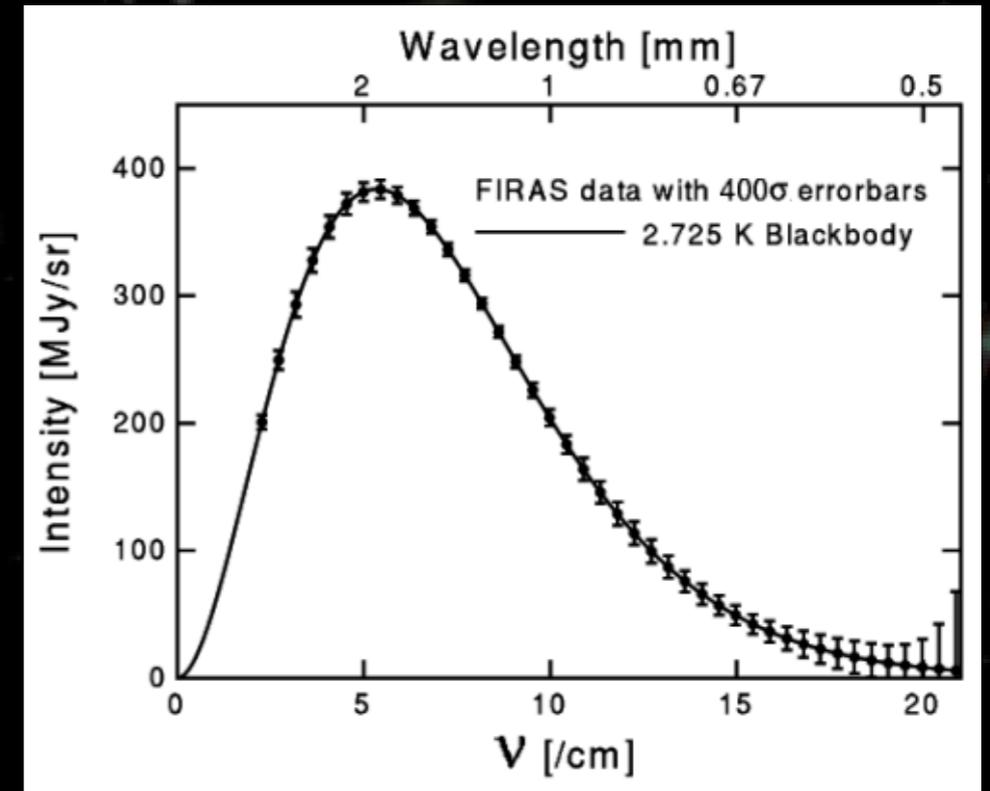
University of California
Berkeley, CA, USA

b. 1945

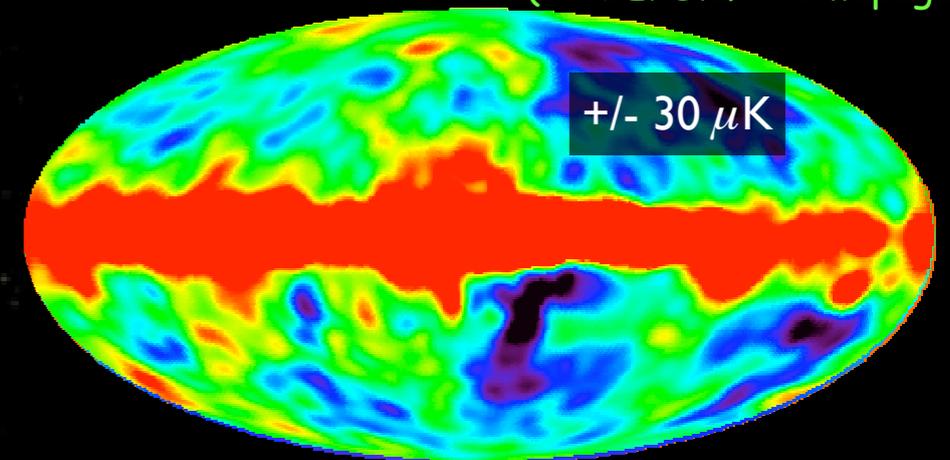
on (1965)

nde

ctuations



(COBE/DMR homepage)



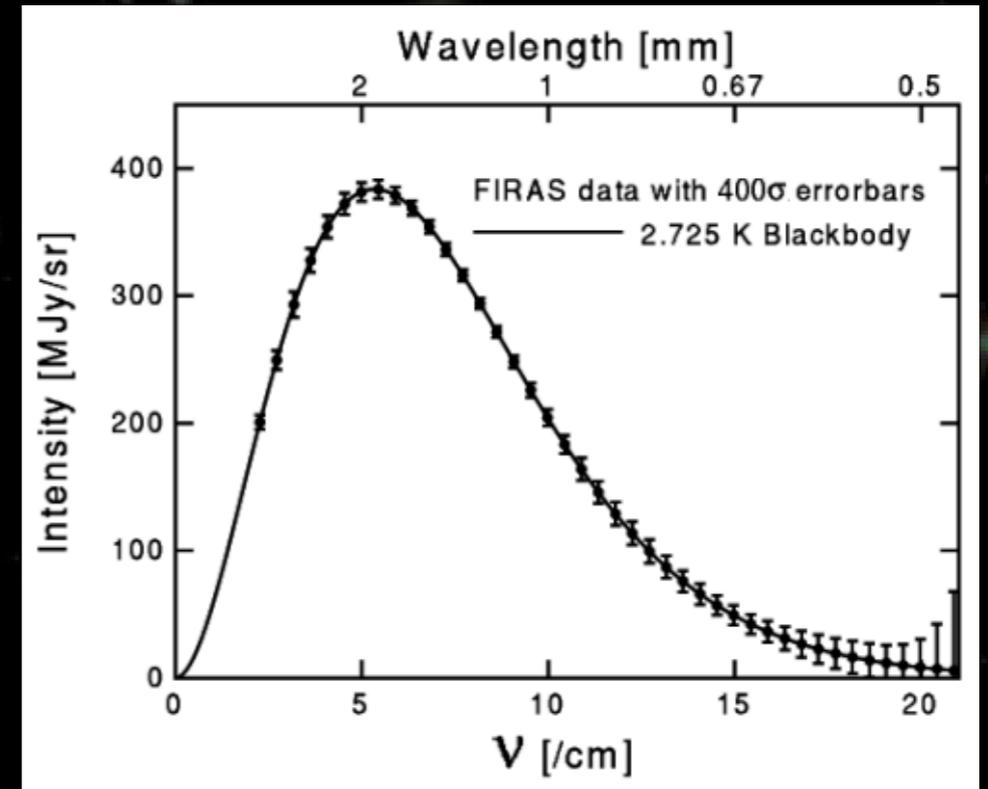
Prix Nobel :

- 1978 : Penzias & Wilson
- 2006 : Smoot & Mather : COBE

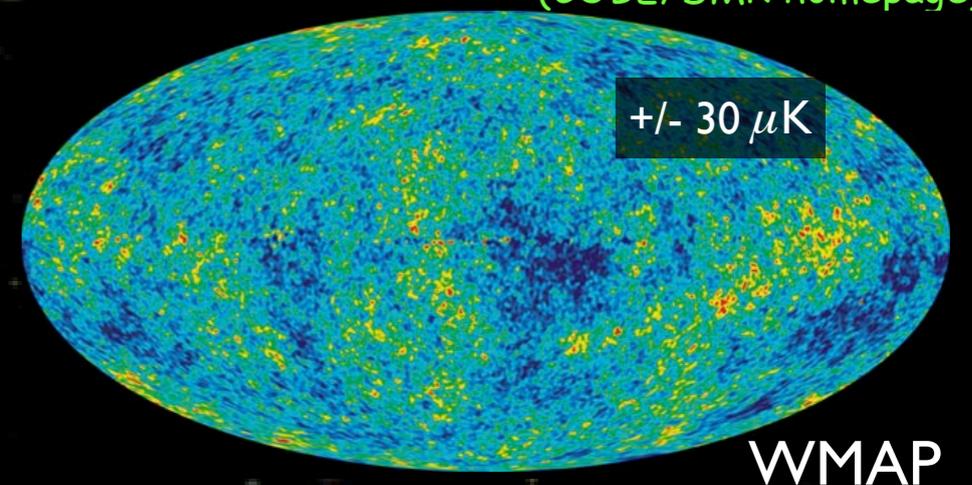


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- *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/cm³
 - Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- *Prix Nobel :*
 - 1978 : Penzias & Wilson
 - 2006 : Smoot & Mather : COBE

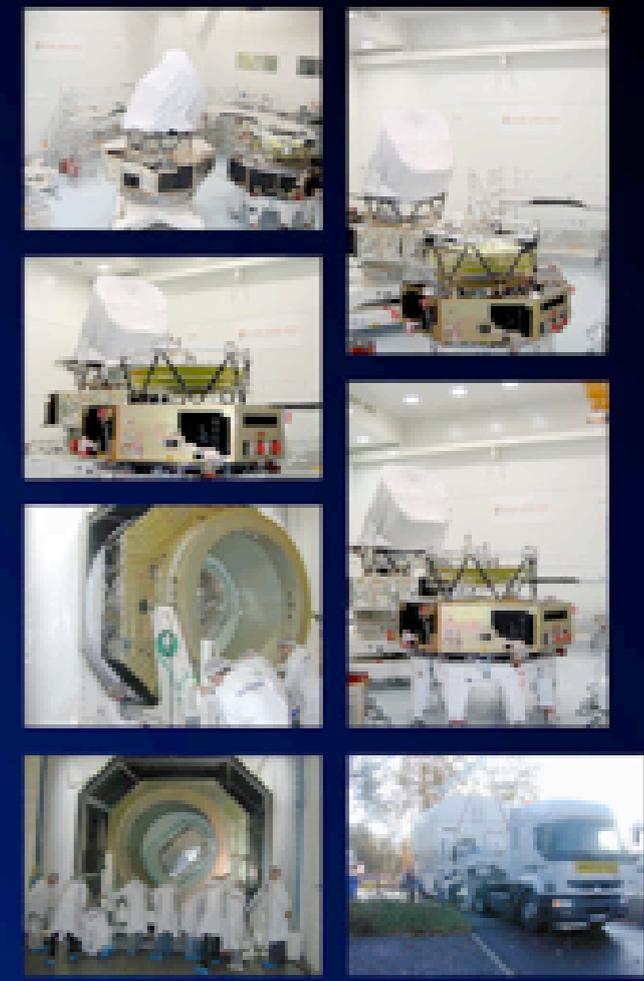
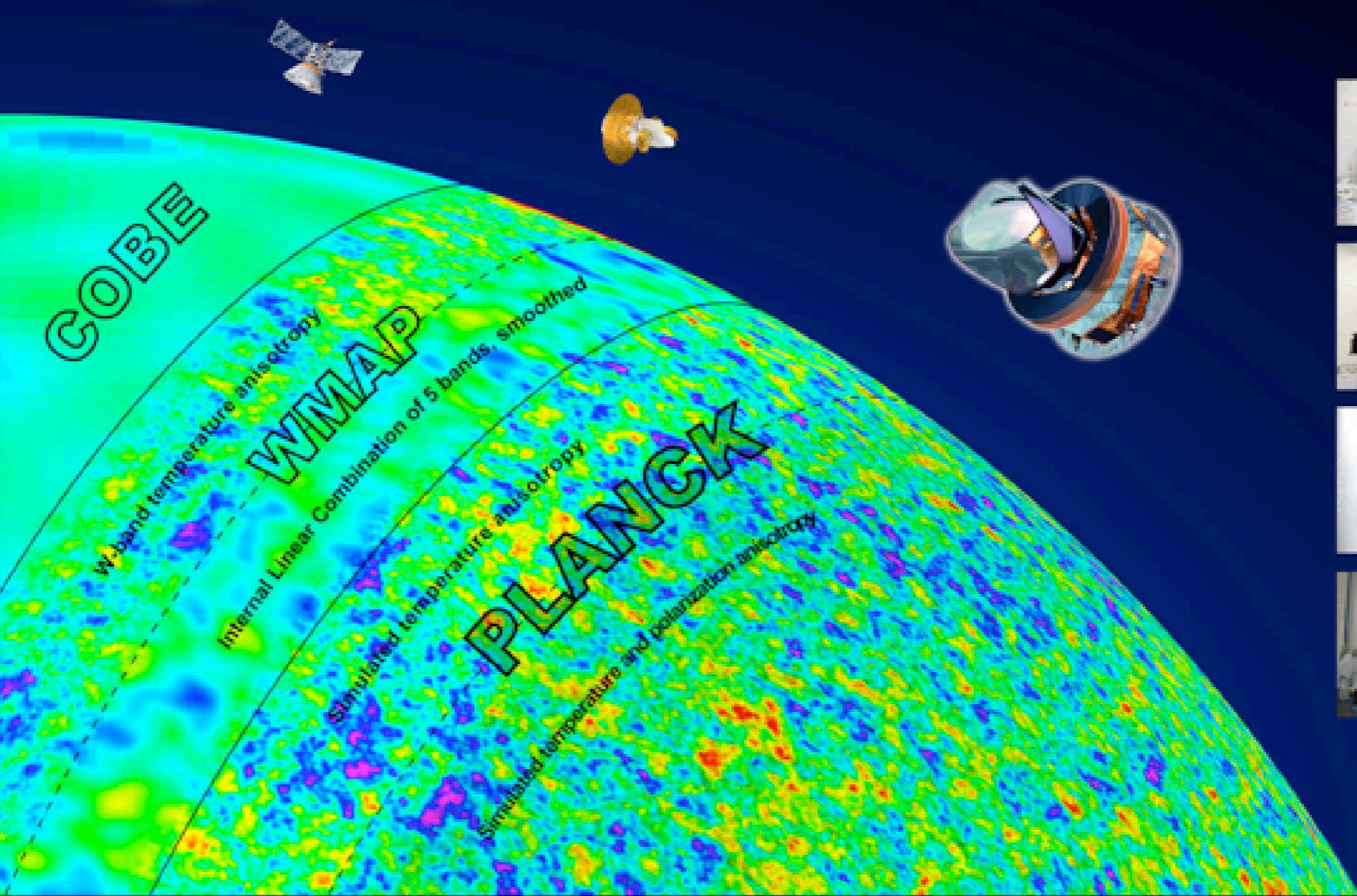


(COBE/DMR homepage)





PLANCK SIMULATION



Relier les anisotropies du CMB aux fluctuations primordiales

- Développement en harmoniques sphériques

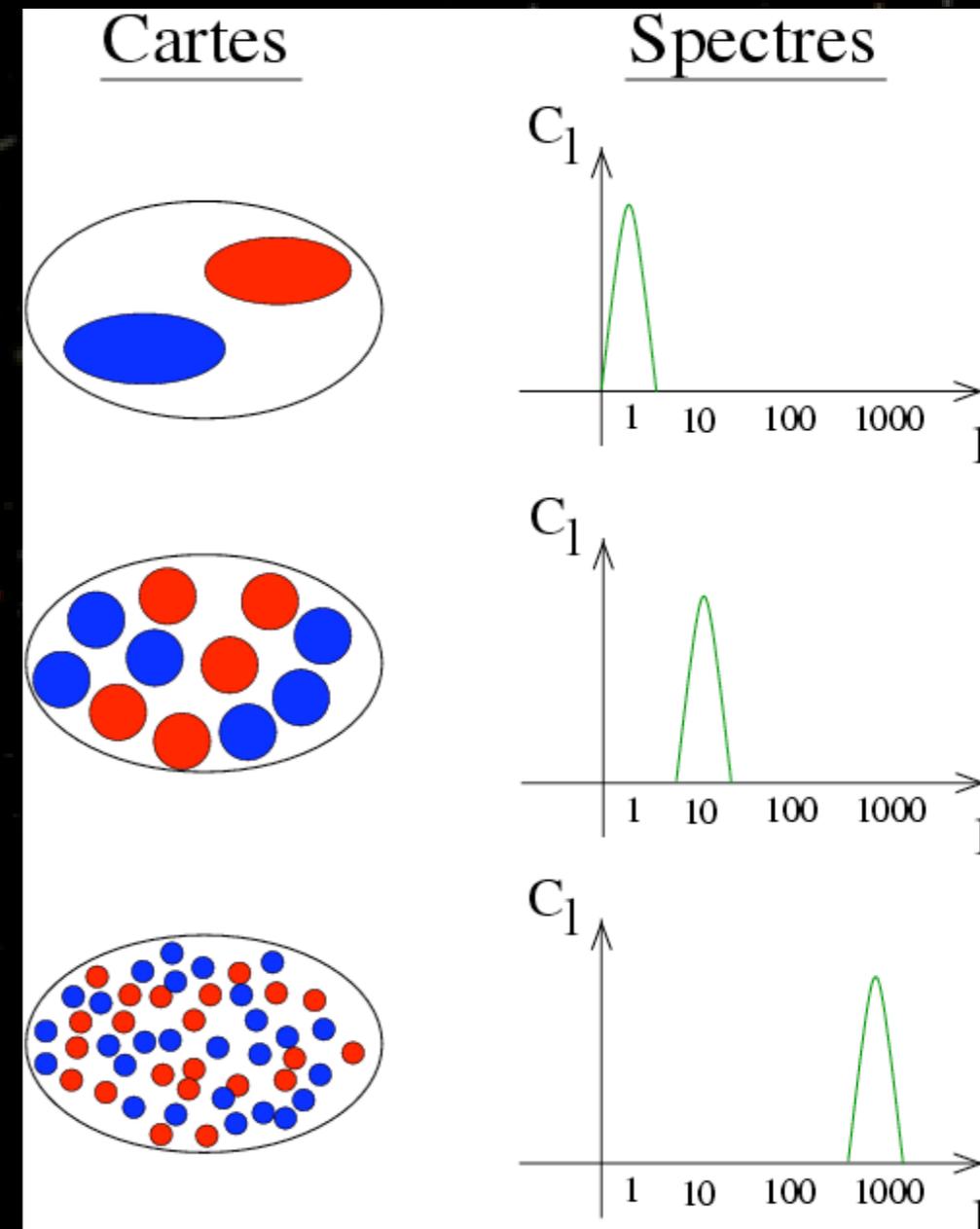
$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

- Spectre de puissance angulaire

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$$

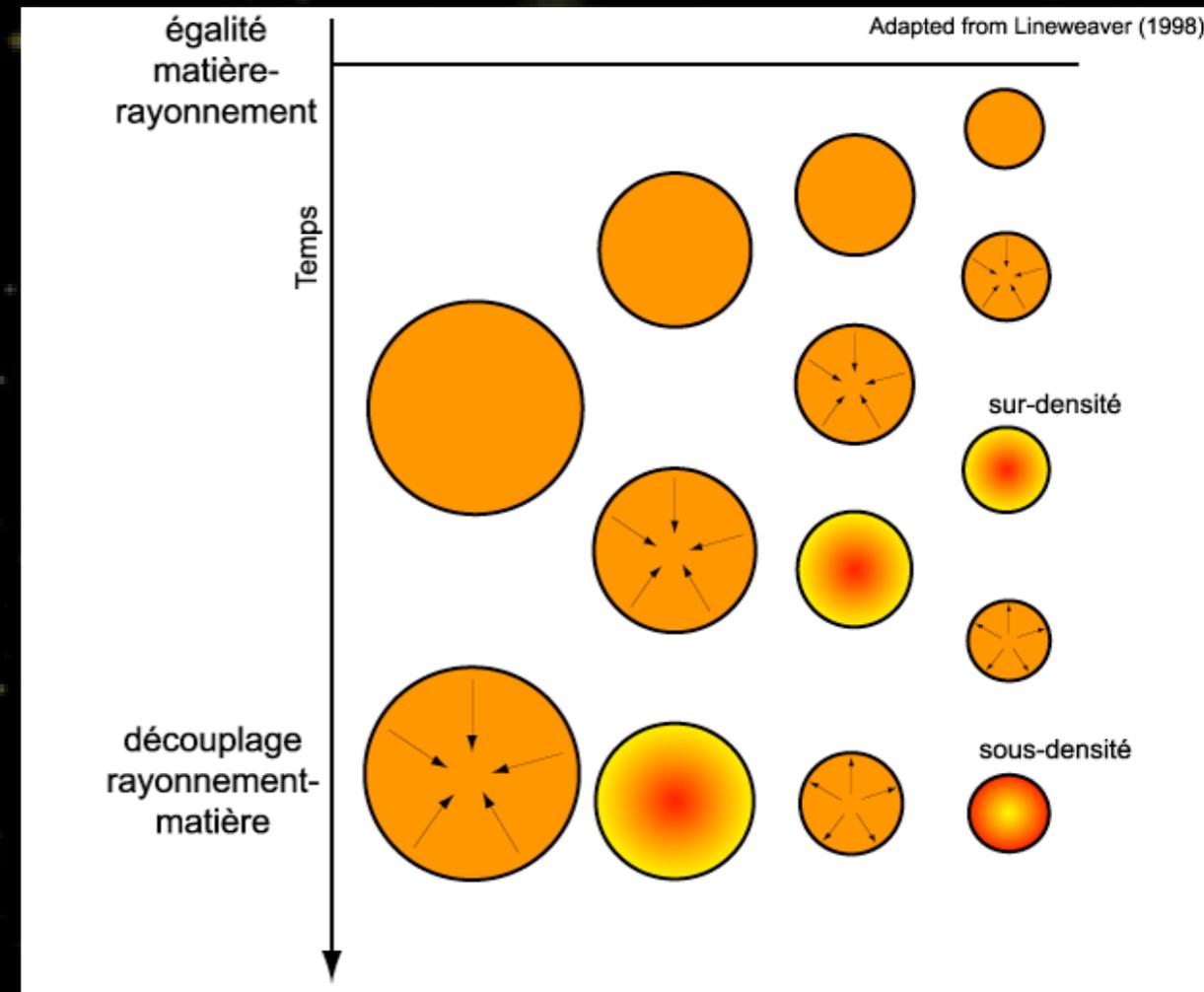
- l est l'inverse d'un angle

$$l = 200 \leftrightarrow \theta = 1\text{deg.}$$



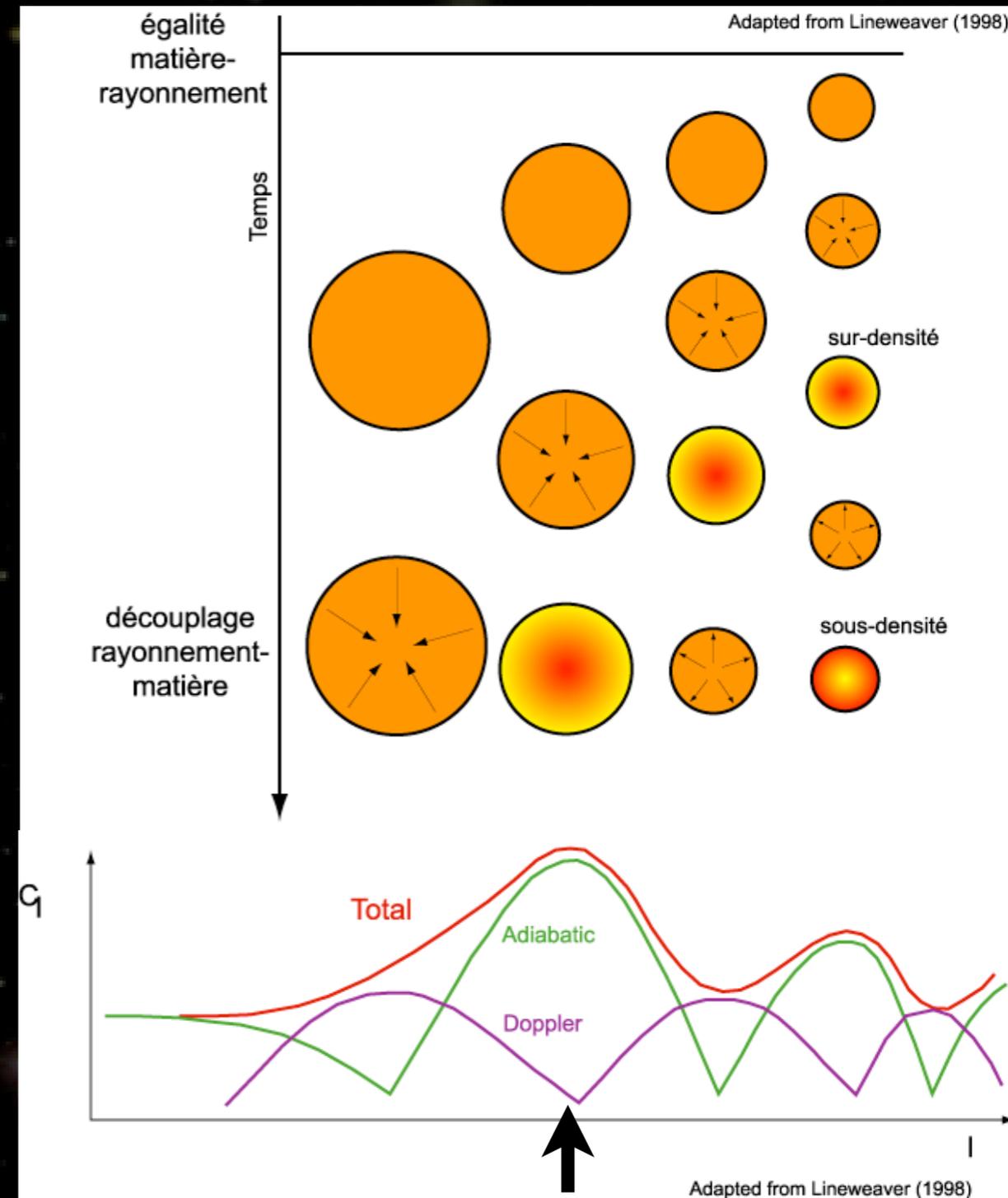
Forme du spectre de puissance

- *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 ($c/3$)*
- *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 ($c/3$)
- les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement



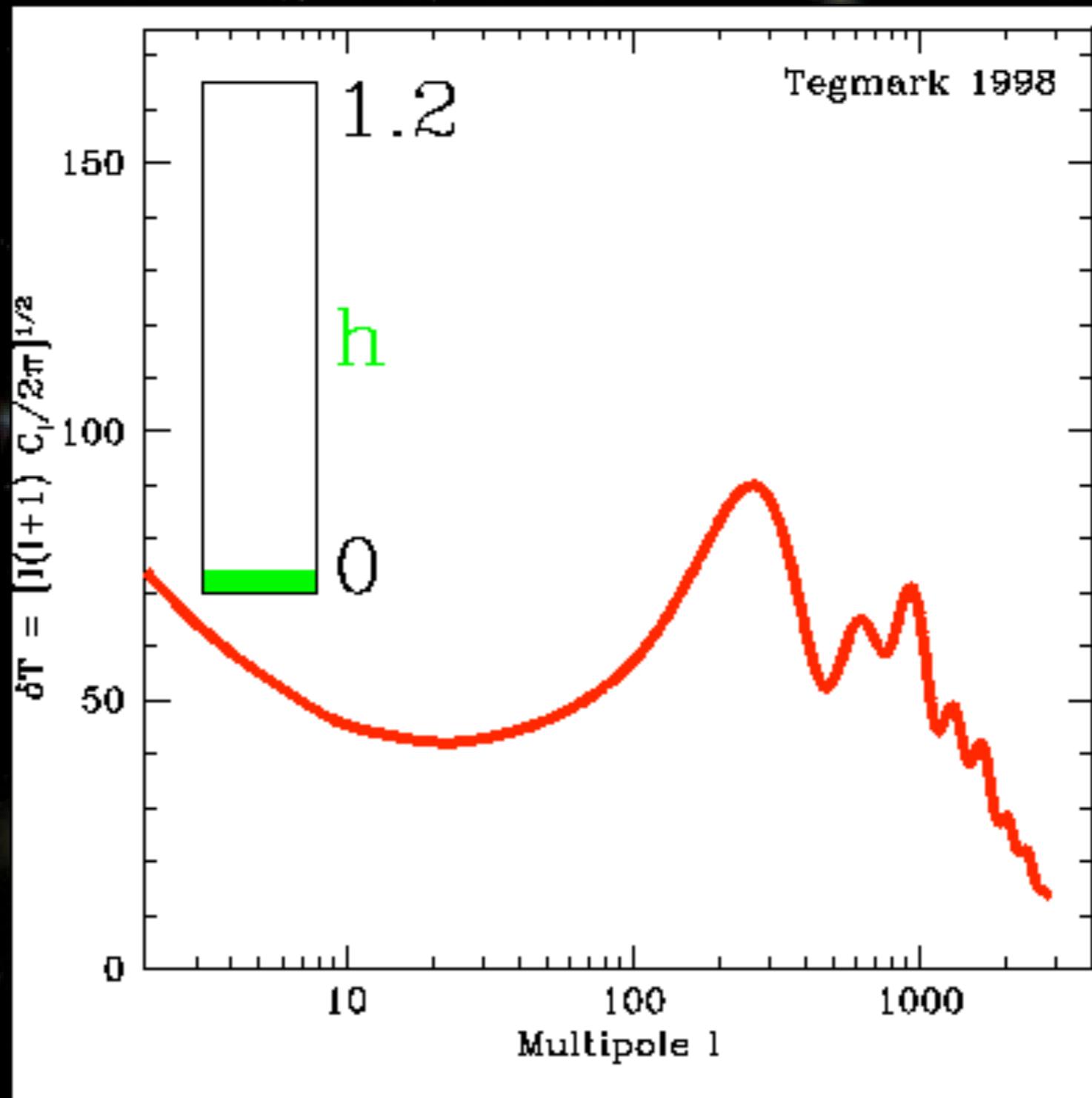
150 Mpc à $z=1000$



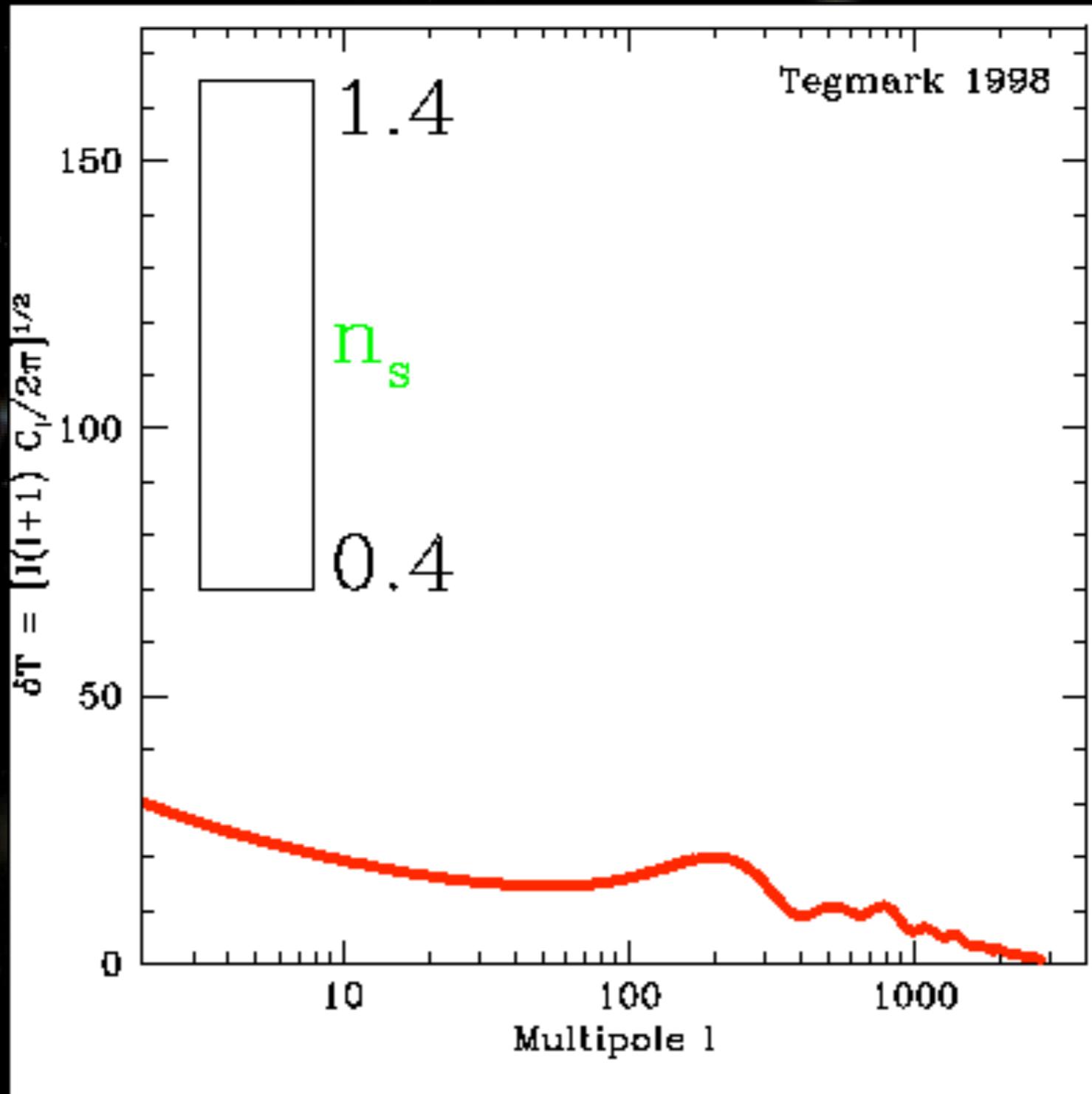
Influence de la géométrie de l'Univers



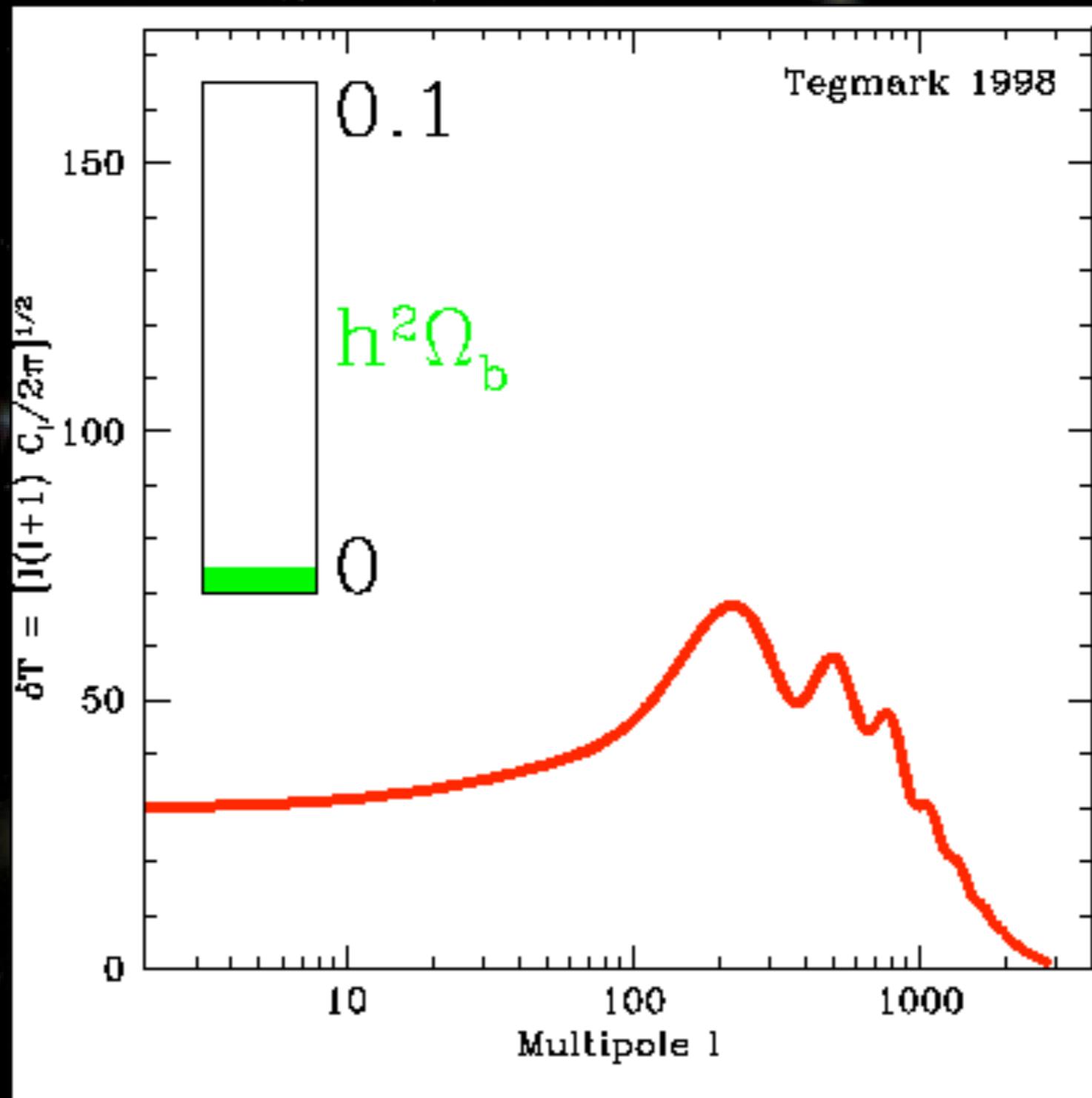
Constante de Hubble



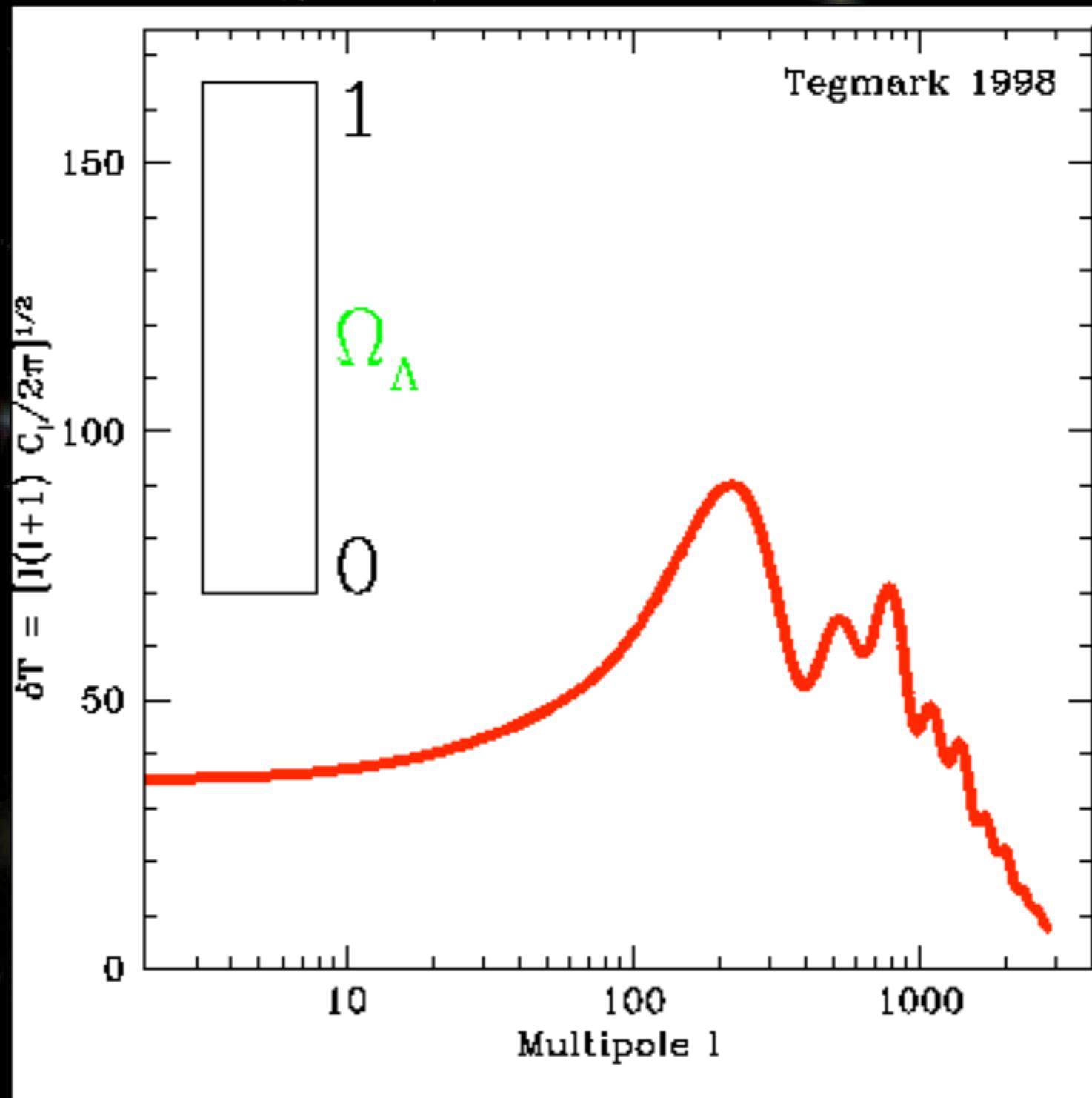
indice spectral (inflation)



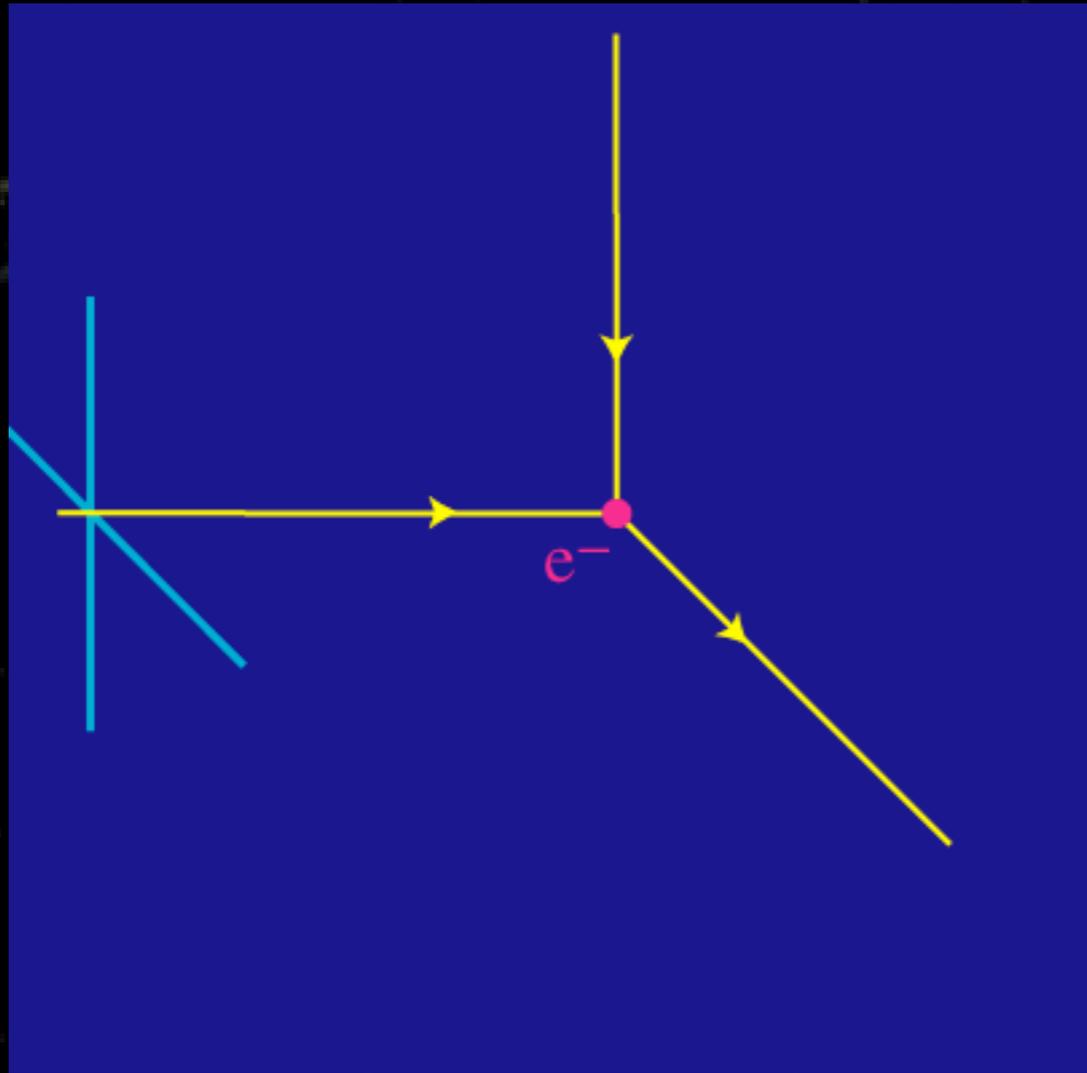
Matière baryonique



Énergie sombre



Le CMB est polarisé ($\sim 10\%$) !

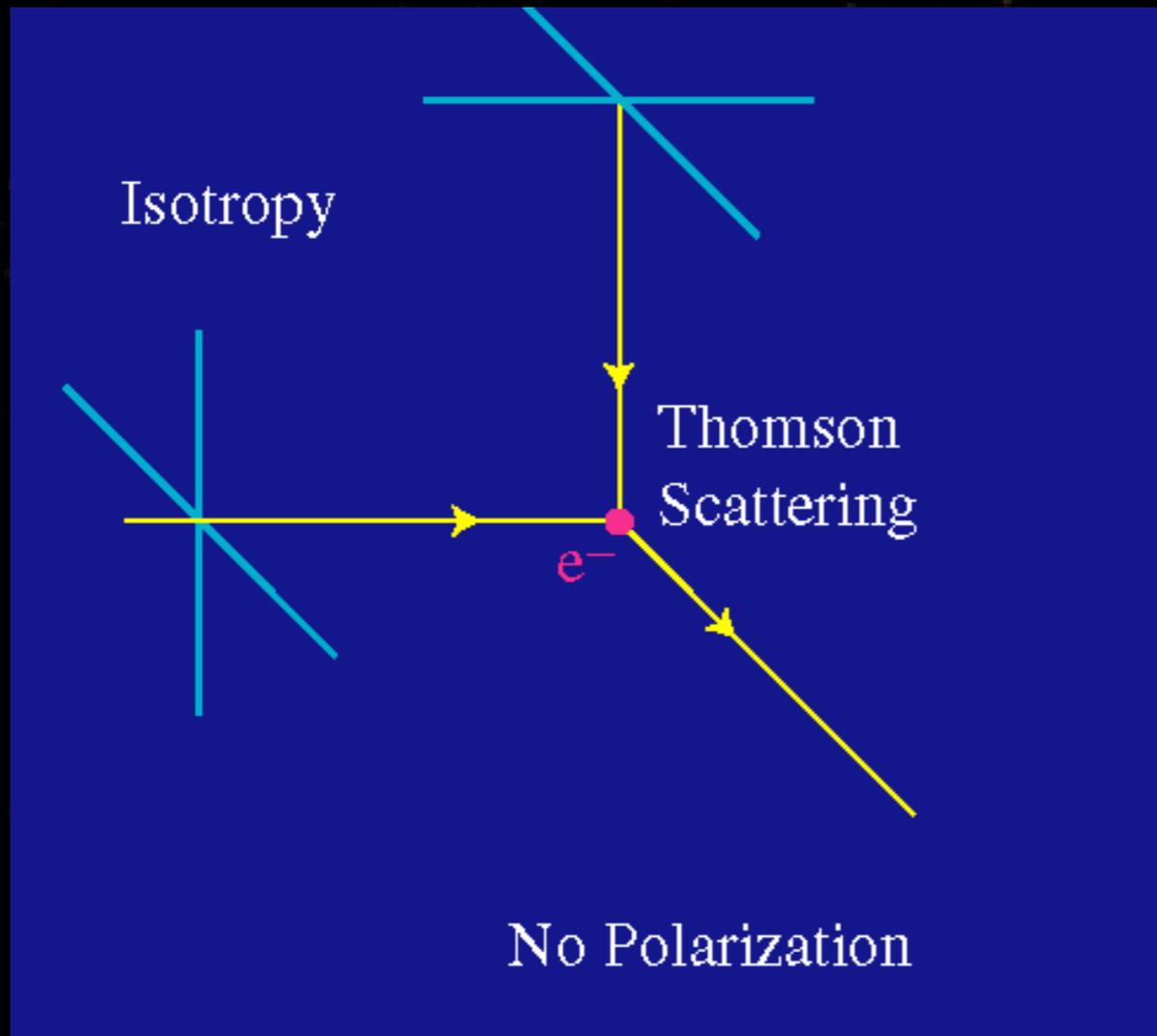


Précieuses informations complémentaires !!!

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



Le CMB est polarisé (~10%) !

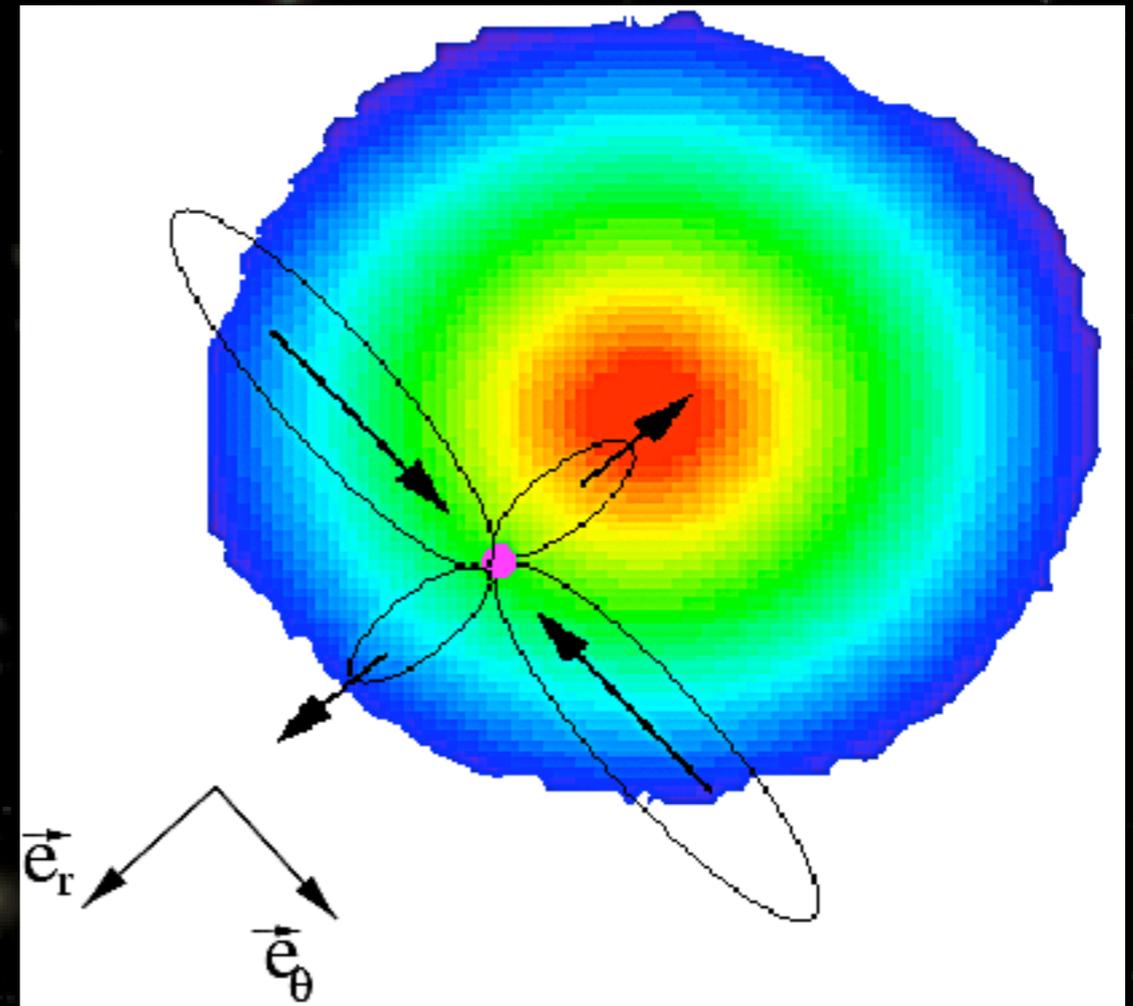
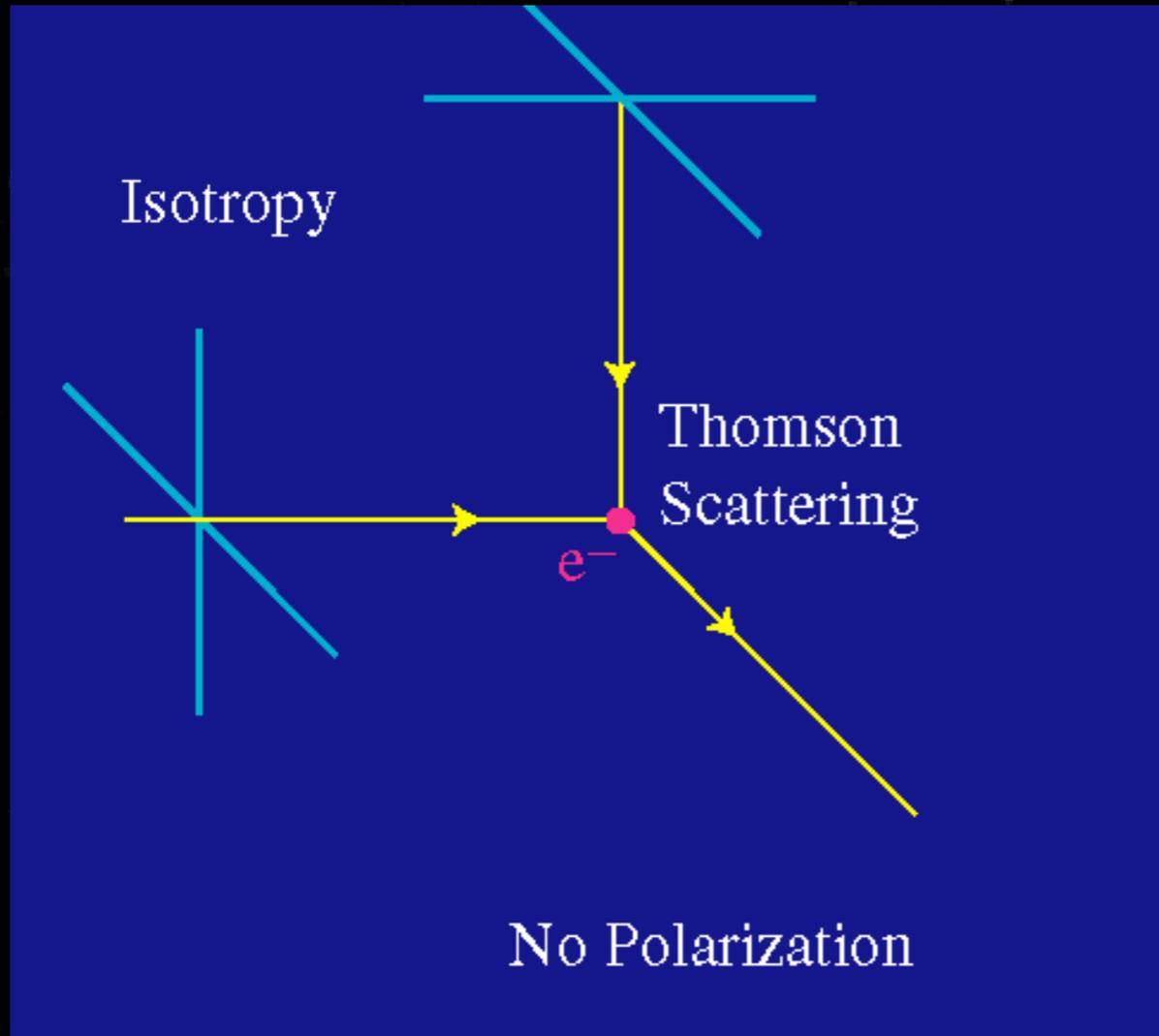


Précieuses informations complémentaires !!!

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



Le CMB est polarisé (~10%) !

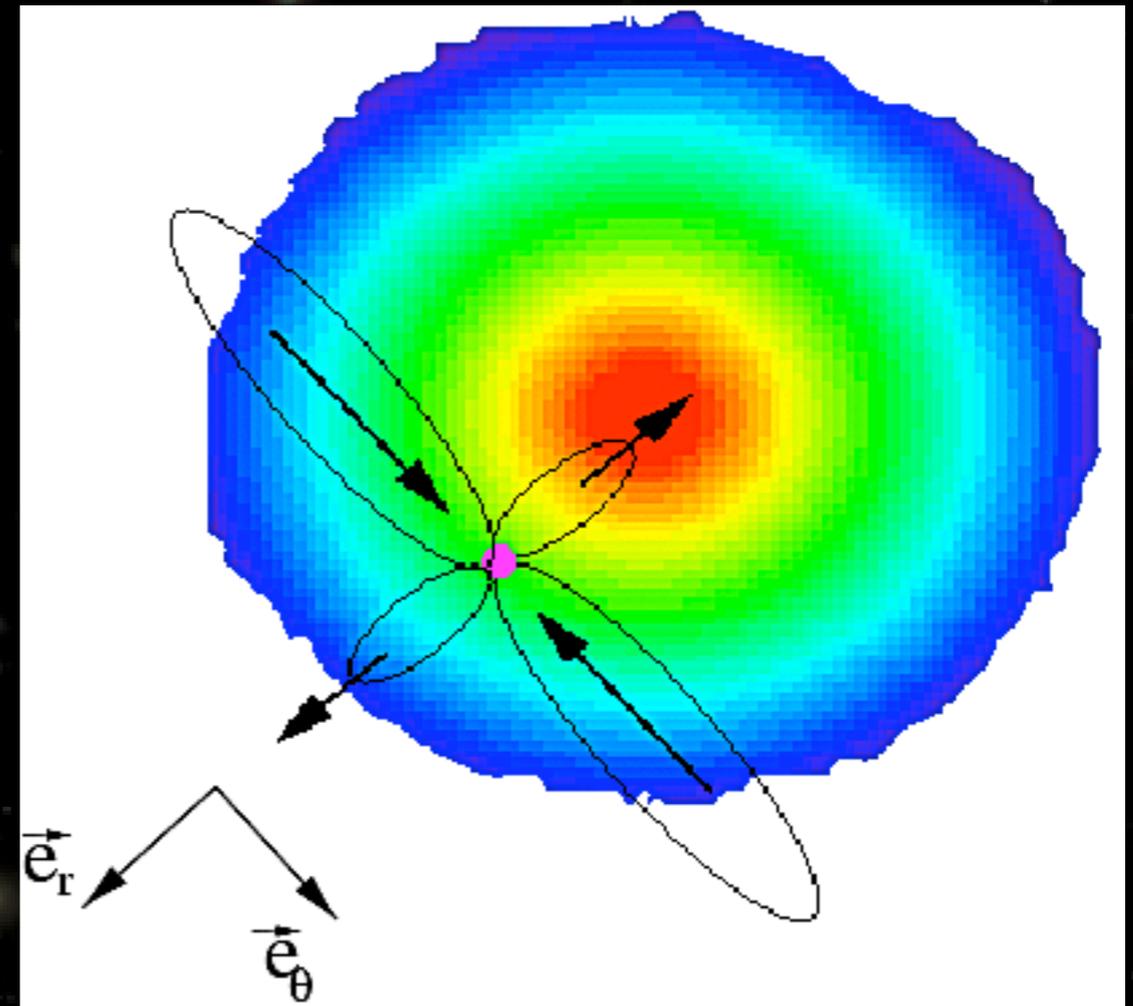
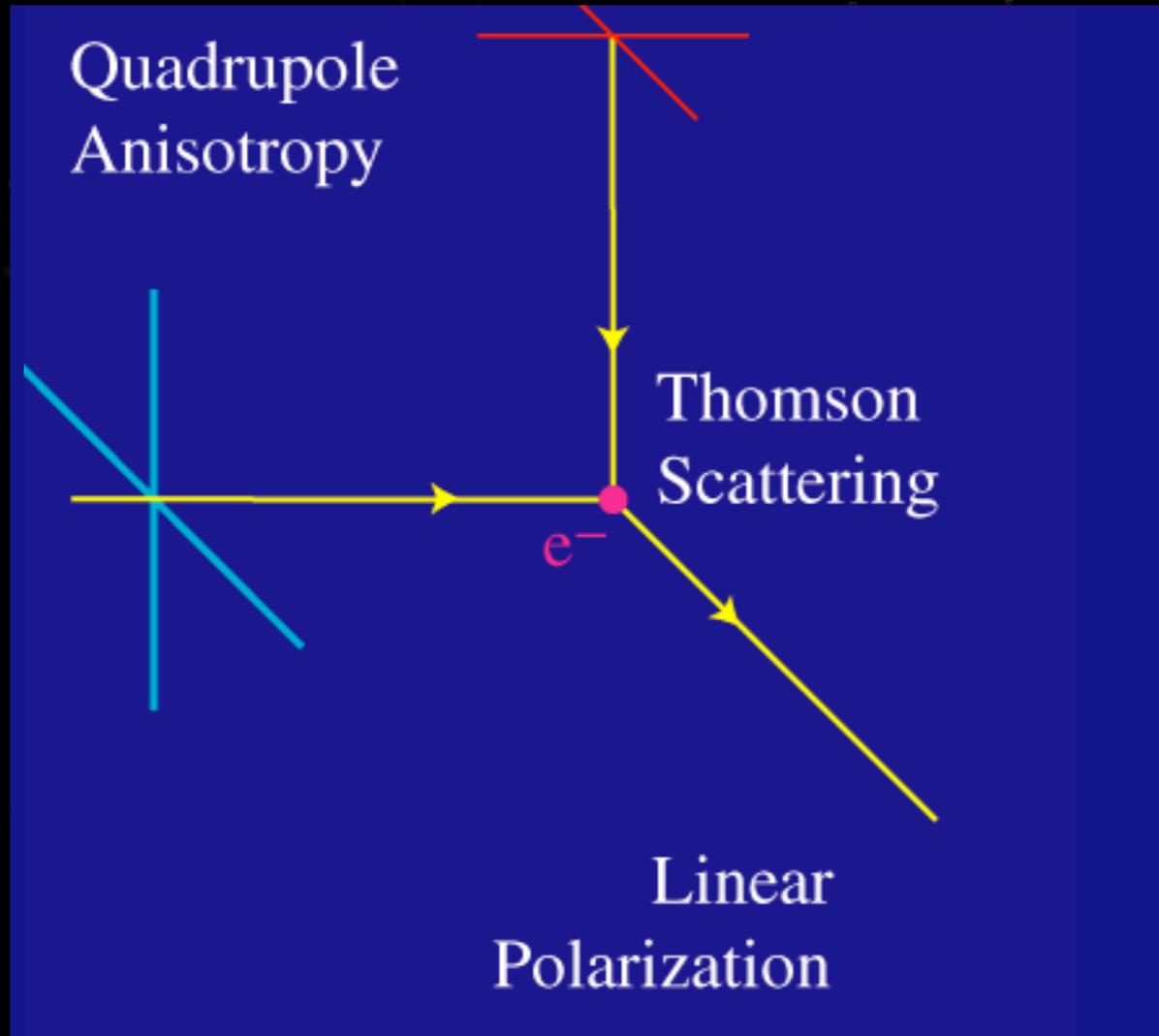


Précieuses informations complémentaires !!!

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



Le CMB est polarisé (~10%) !

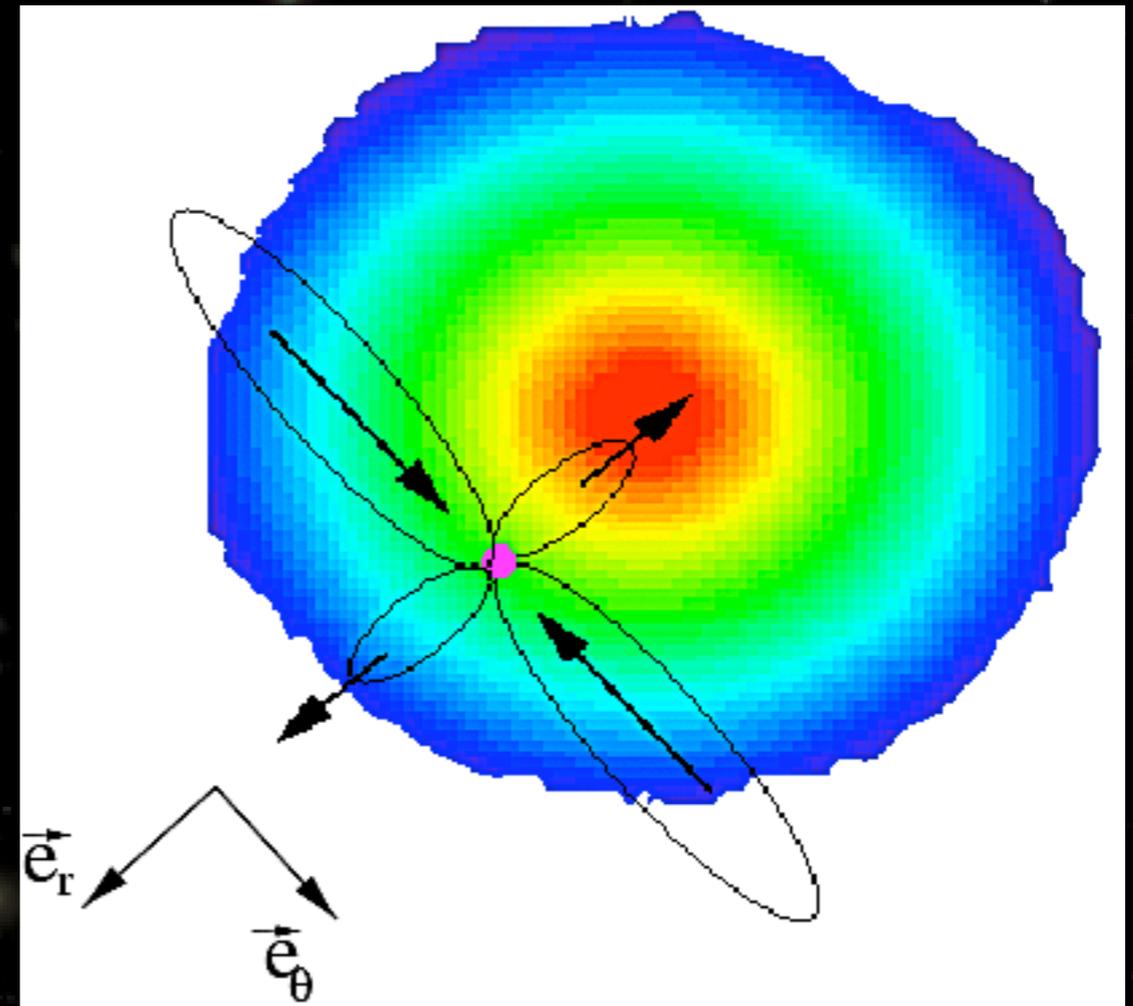
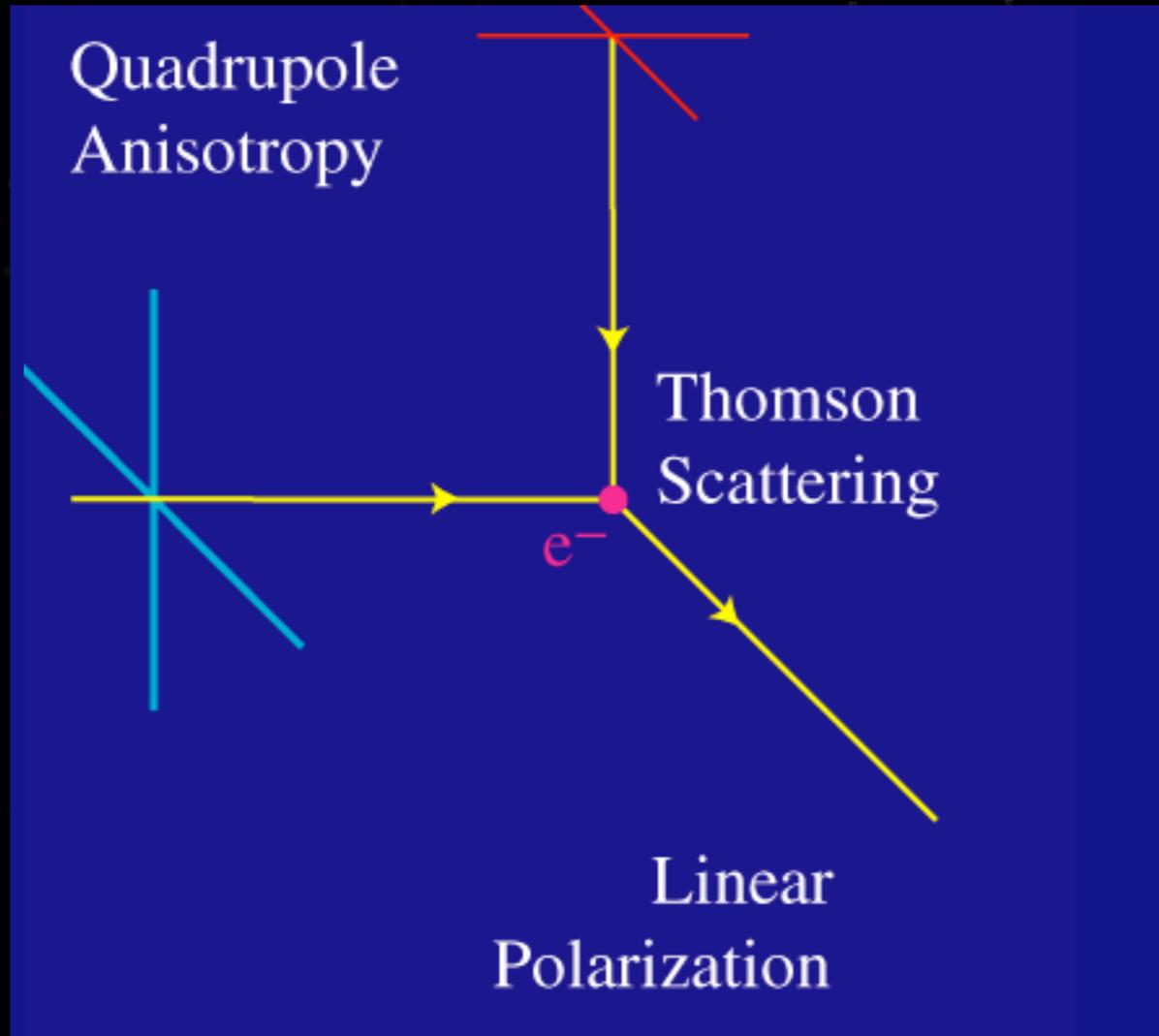


Précieuses informations complémentaires !!!

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



Le CMB est polarisé (~10%) !



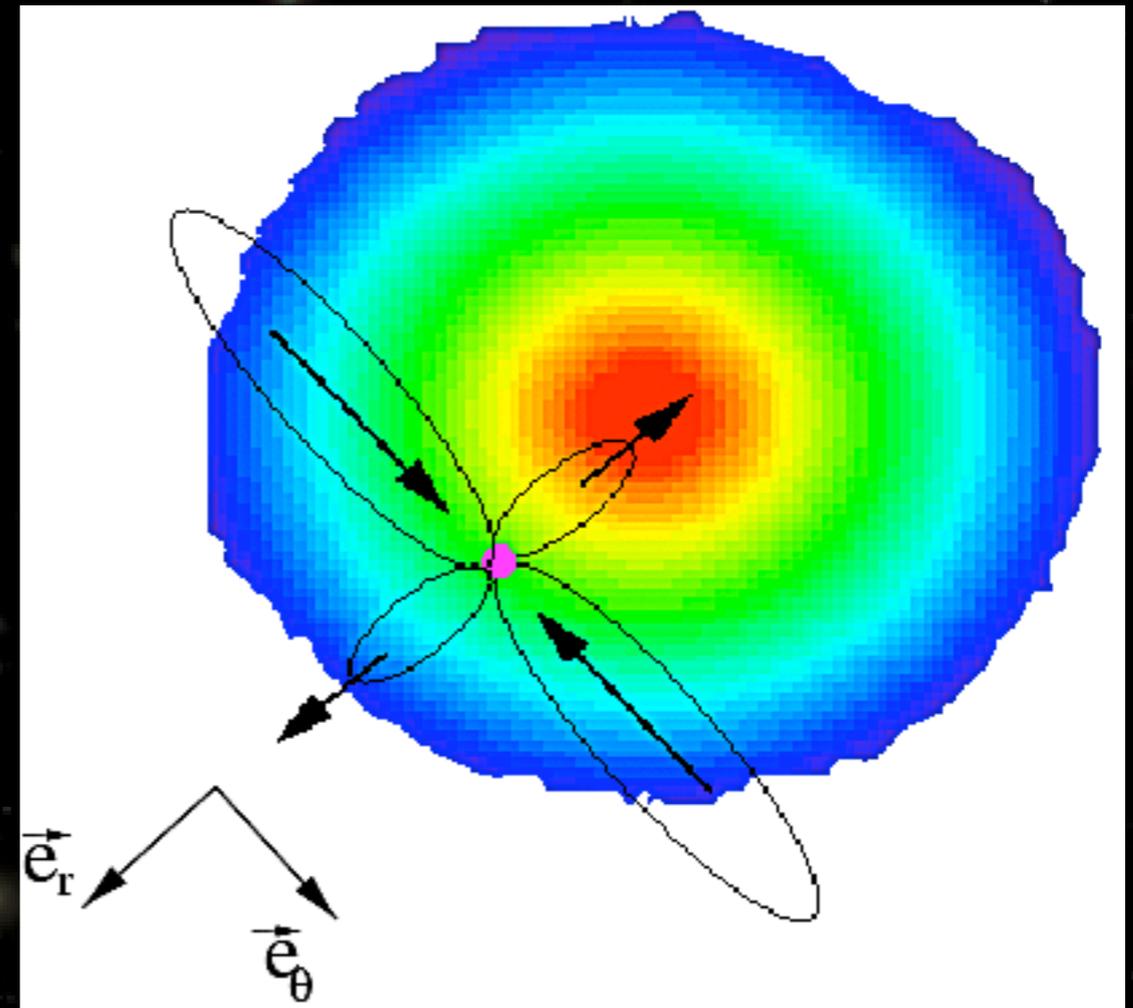
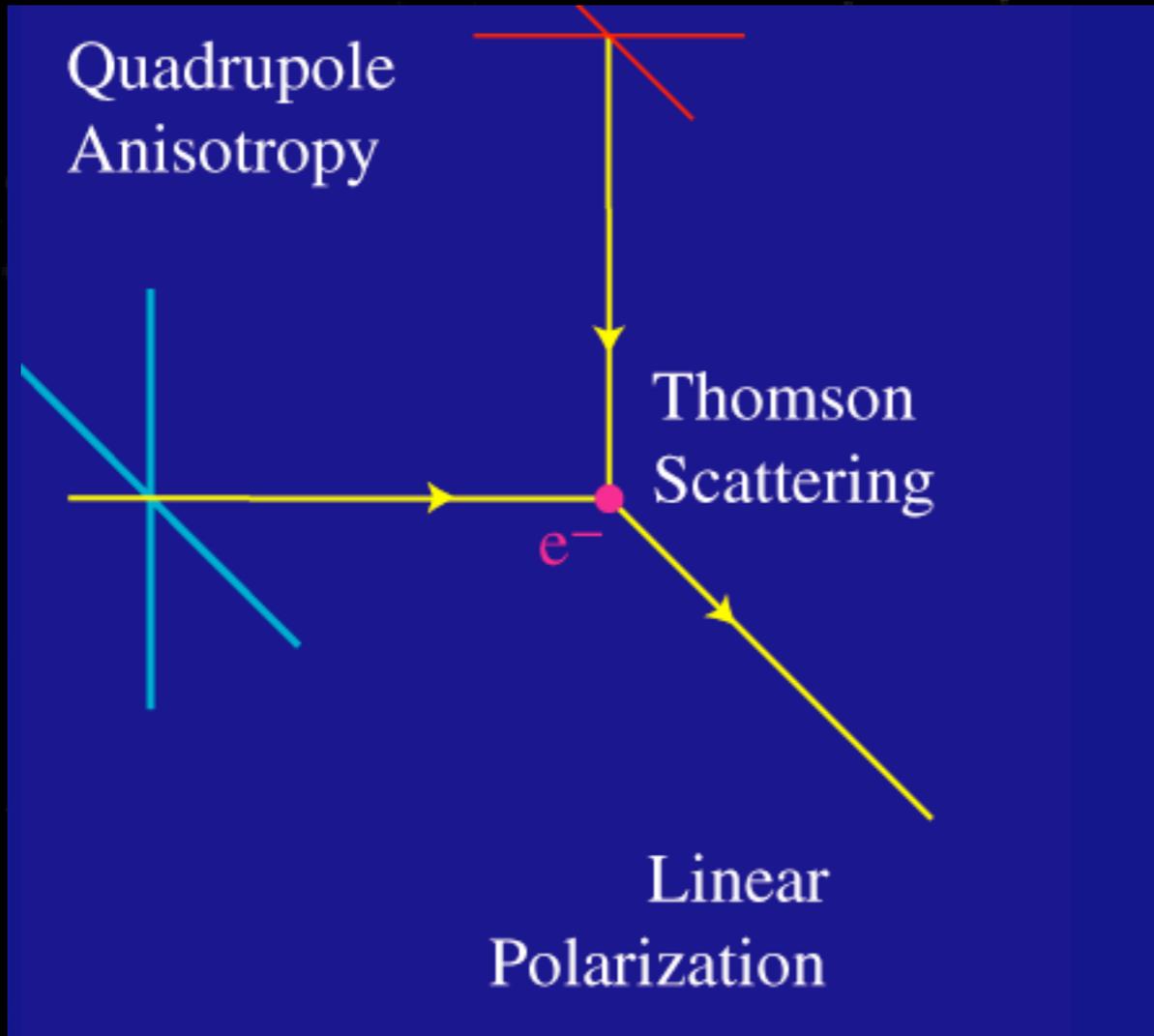
Précieuses informations complémentaires !!!

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

modes scalaires



Le CMB est polarisé (~10%) !



Précieuses informations complémentaires !!!

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

modes scalaires tenseurs

perturbations tensorielles
=
Ondes gravitationnelles
primordiales



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

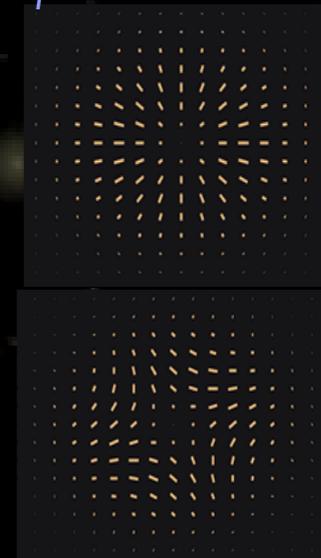
$$Q(\vec{n}) + iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{2,\ell m} {}_2Y_{\ell m}(\vec{n})$$

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

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

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

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



modes scalaires et tenseurs

- *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**

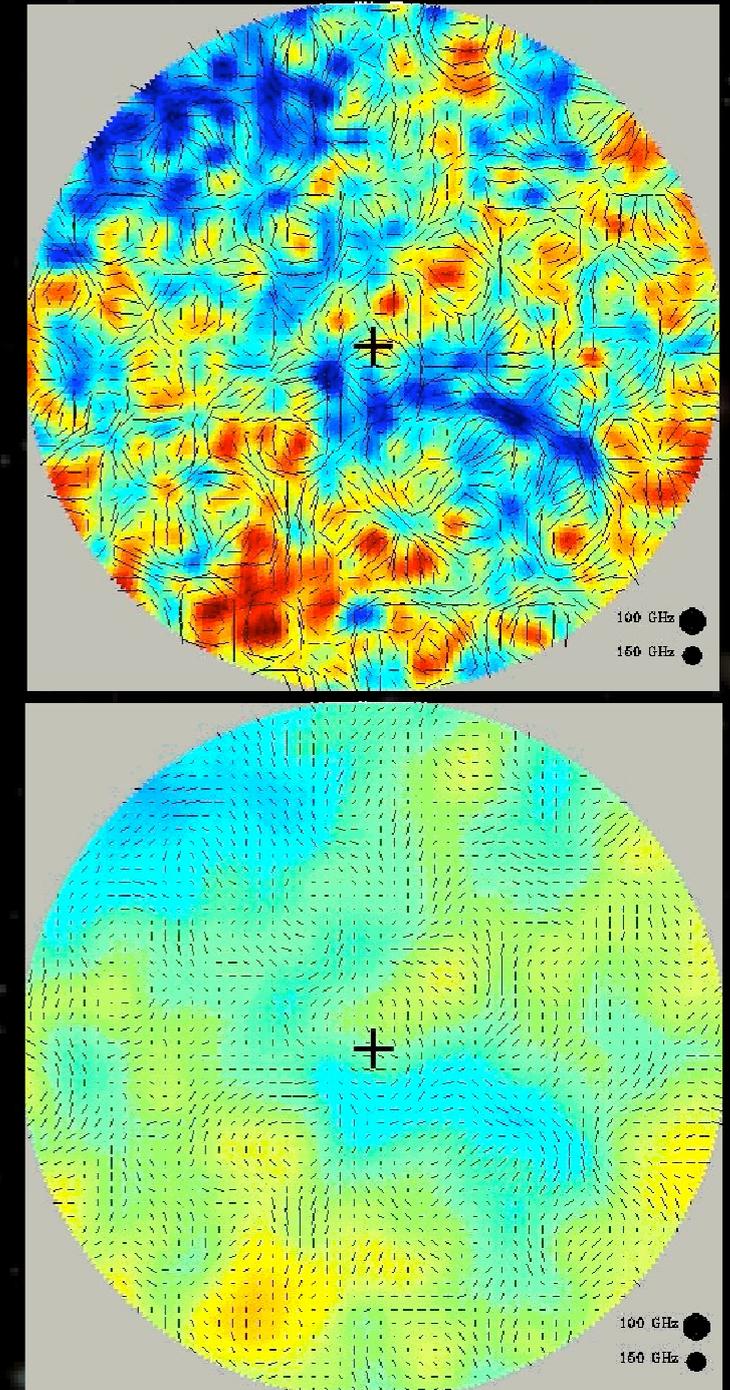
- Température
- Polarisation E
- Polarisation B

$$\sigma_{tens}^T \leq 30 \mu\text{K}$$
$$\sigma_{tens}^E \leq 1 \mu\text{K}$$
$$\sigma_{tens}^B \leq 0.3 \mu\text{K}$$

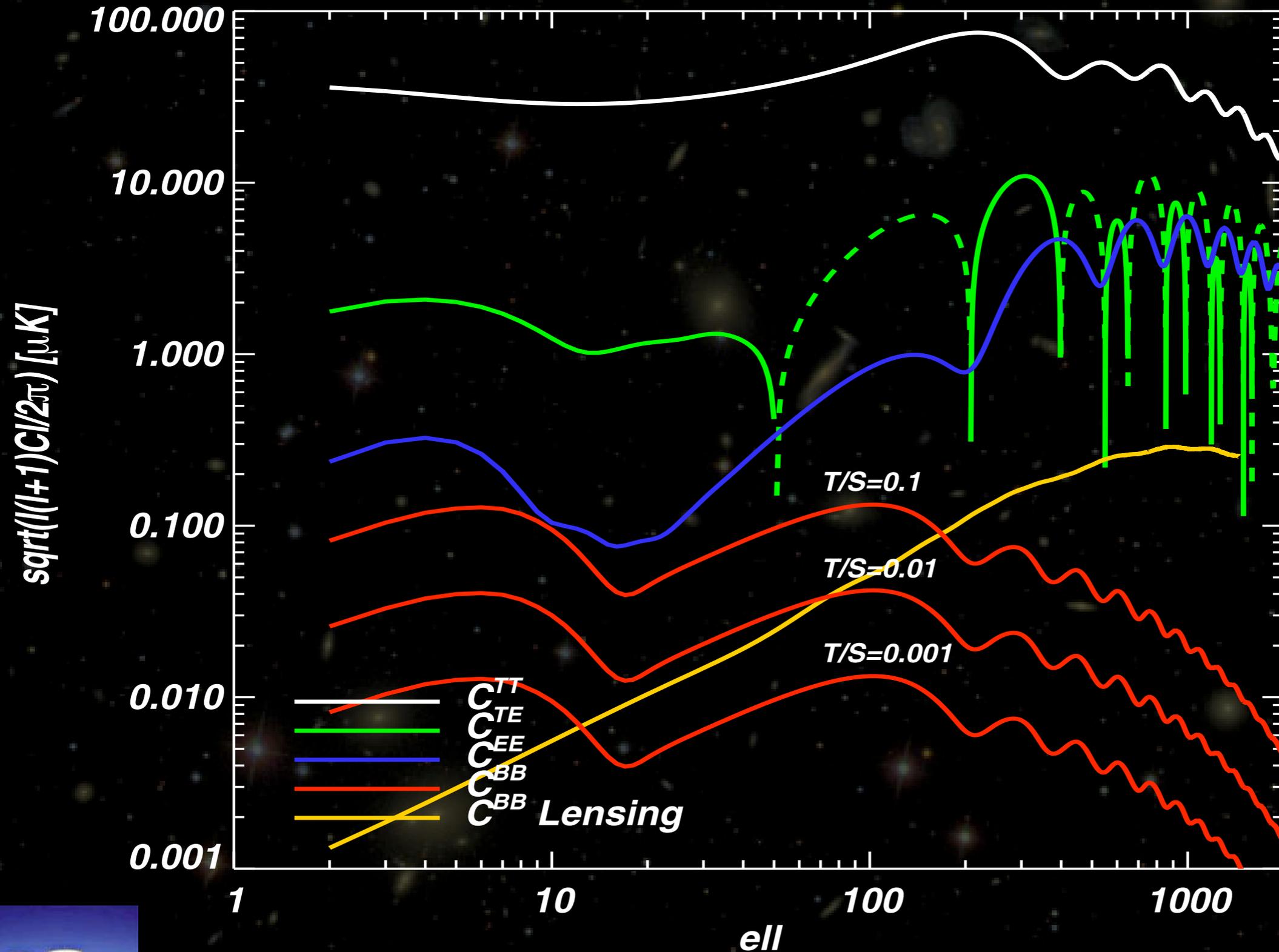
Rapport tenseur/scalaire = r



Masse de l'inflaton



prédictions de l'inflation

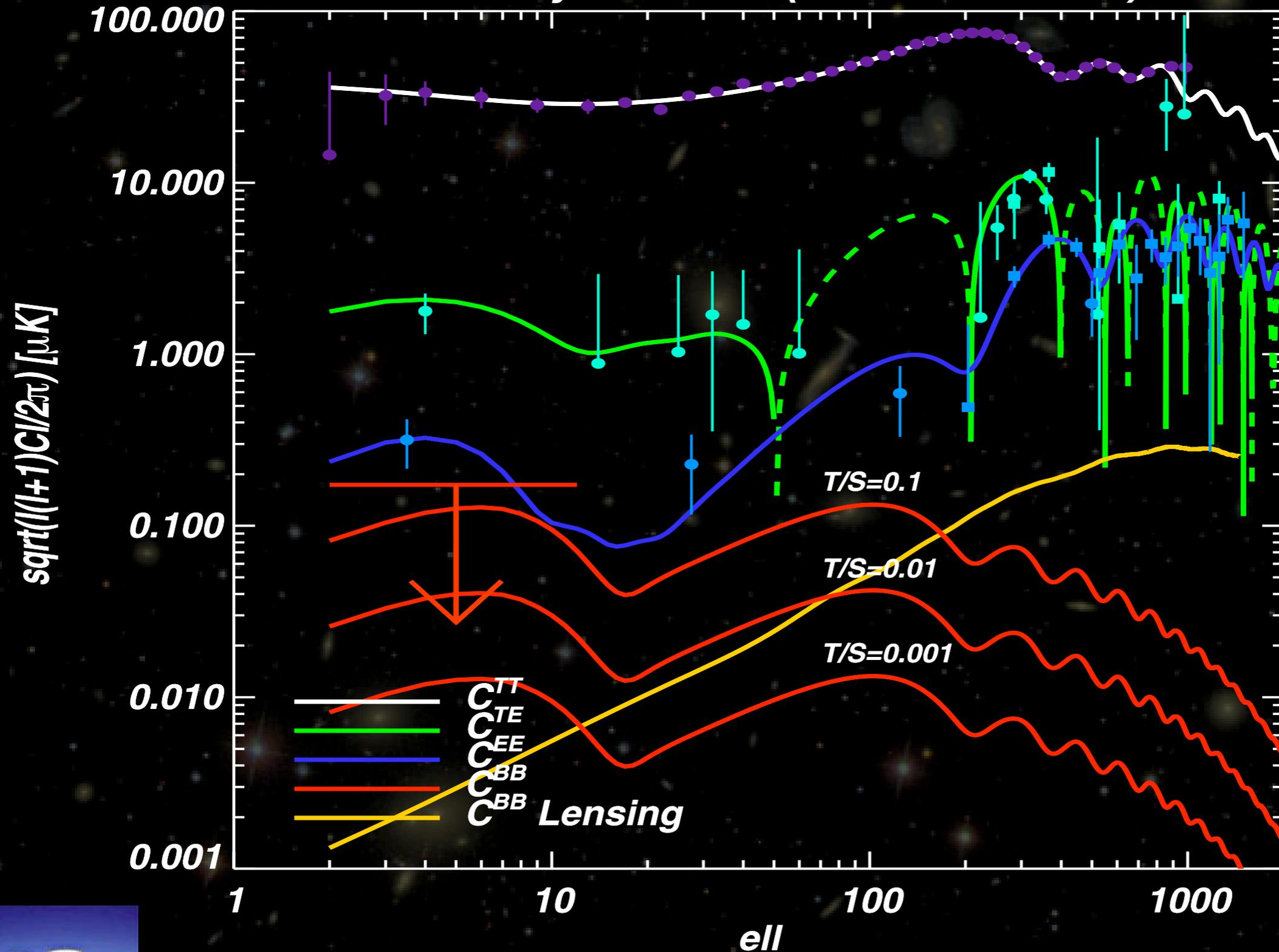


Prédictions des modèles d'inflation "classiques"
 $0.001 < T/S < 0.3$



prédictions de l'inflation

WMAP3y + QUAD (Ade et al. 2007)

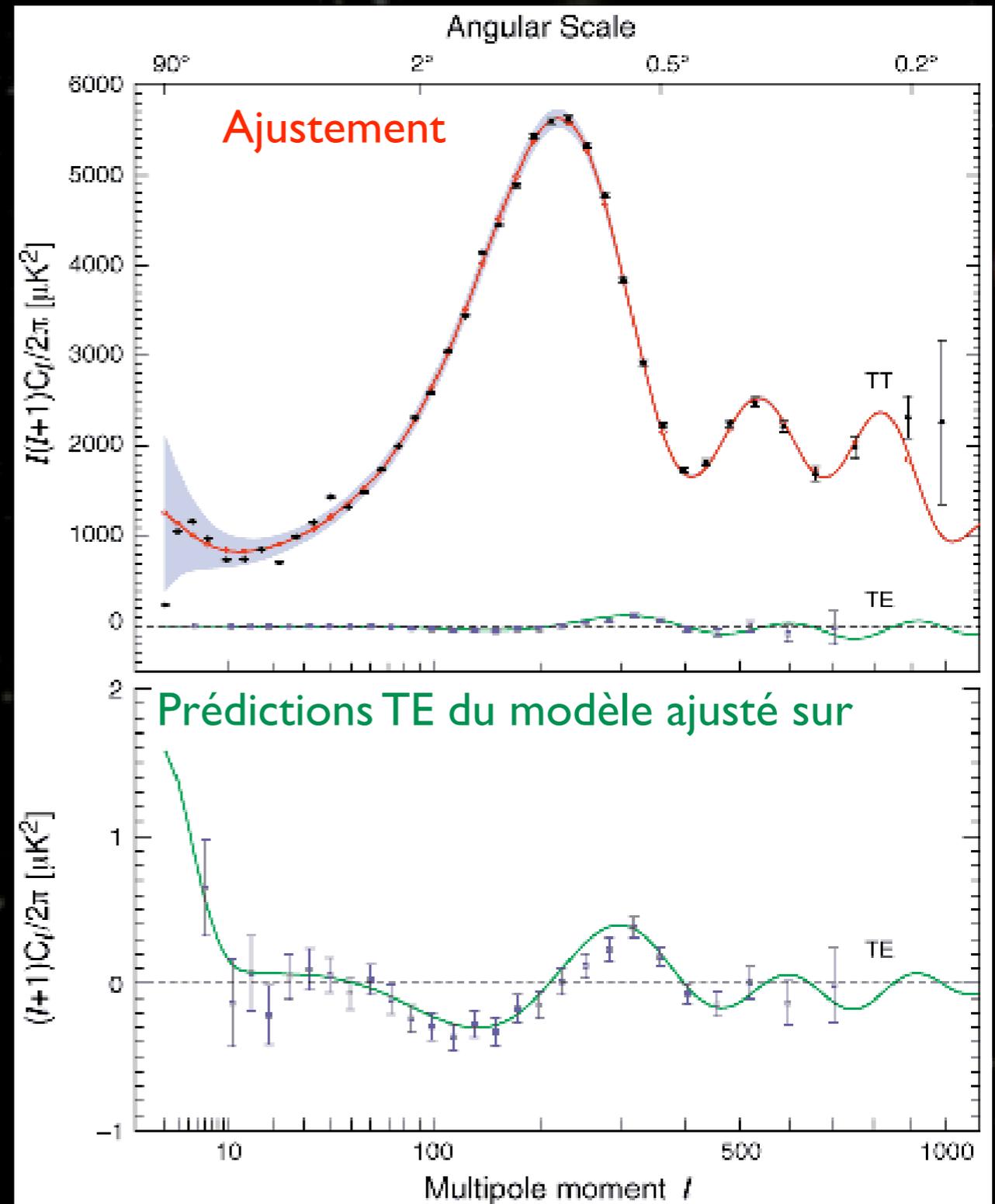


Prédictions des modèles d'inflation "classiques"
 $0.001 < T/S < 0.3$



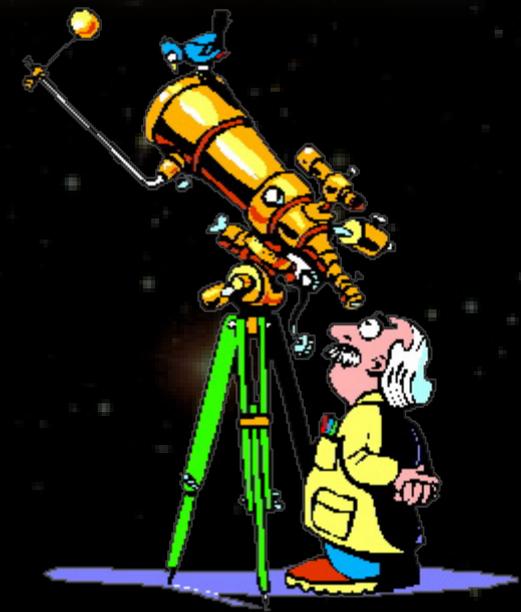
Spectres et mesures

- *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
 - $r < 0.7$



modes B : le Graal de la cosmologie

- *Ondes gravitationnelles primordiales*
 - Observation directe de l'inflation
 - r directement relié à la masse de l'inflaton
 - prédictions : $0.001 < r < 0.3$
 - preuve de la nature quantique de la gravitation
- *Cordes cosmiques ?*
 - contribution faible à la formation des structures...
 - ... mais il doit pourtant y en avoir ...
 - Contribution significative aux modes B
 - [Bevis et al., Phys.Rev.D76:043005,2007]
- *Supercordes ?*
 - Toutes les théories de cordes connues prédisent $r \ll 1$
 - opportunité unique de "falsifier" les cordes ...
 - [Kallosh & Linde, JCAP 0704:017,2007]



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)

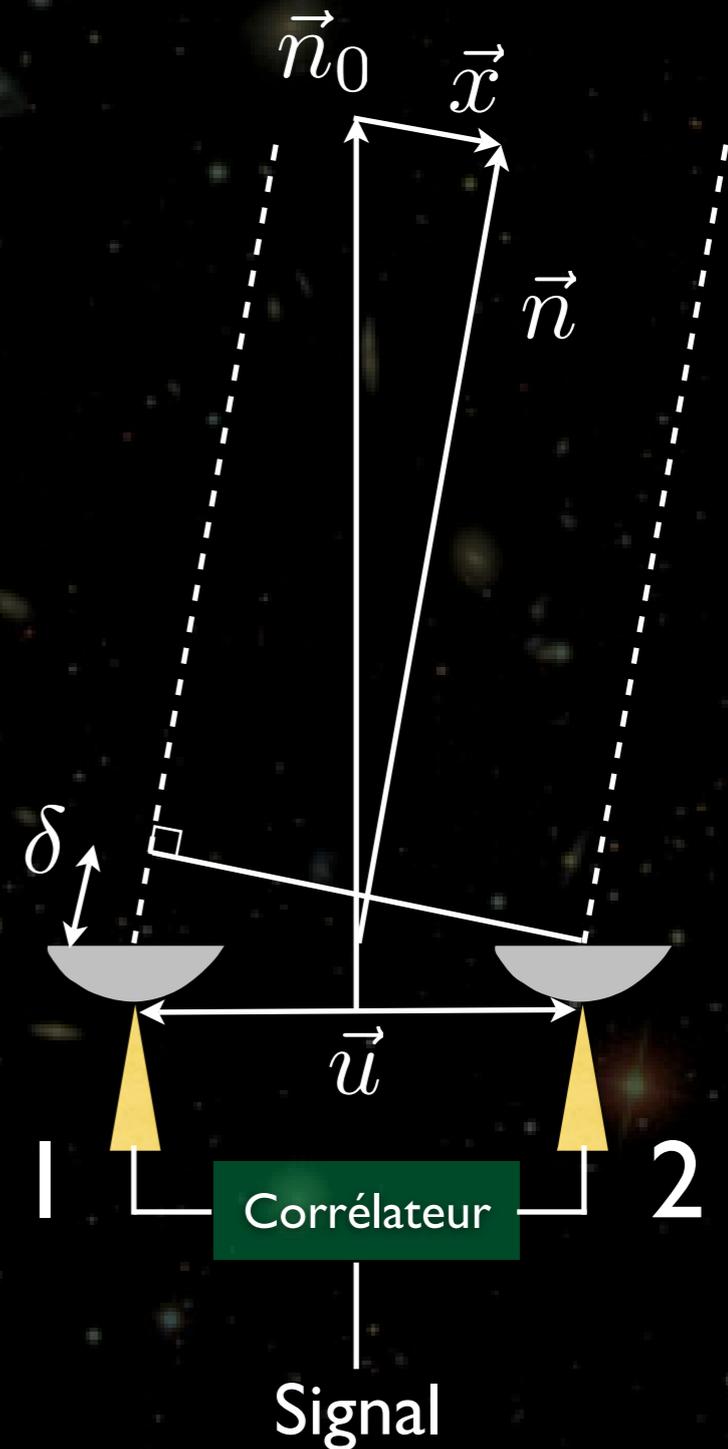


l'interférométrie en bref

- 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)

NB: MBI est un autre projet d'interféromètre bolométrique



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

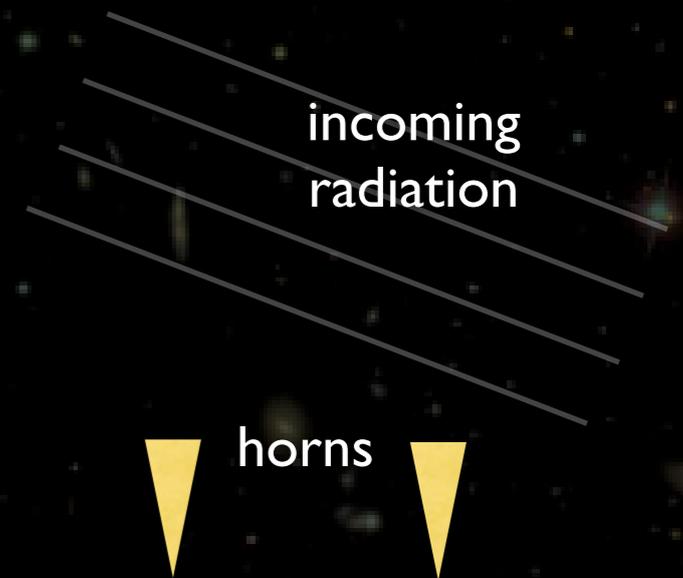
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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)



NB: MBI est un autre projet d'interféromètre bolométrique



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

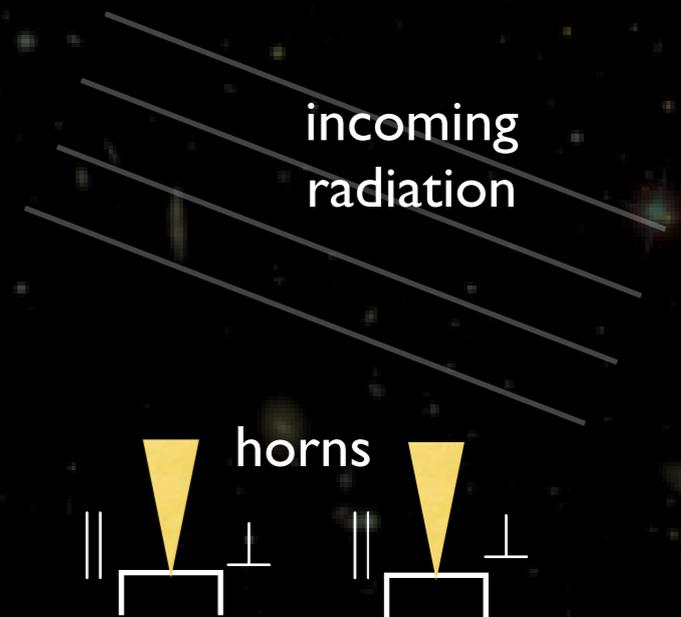
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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)



NB: MBI est un autre projet d'interféromètre bolométrique



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

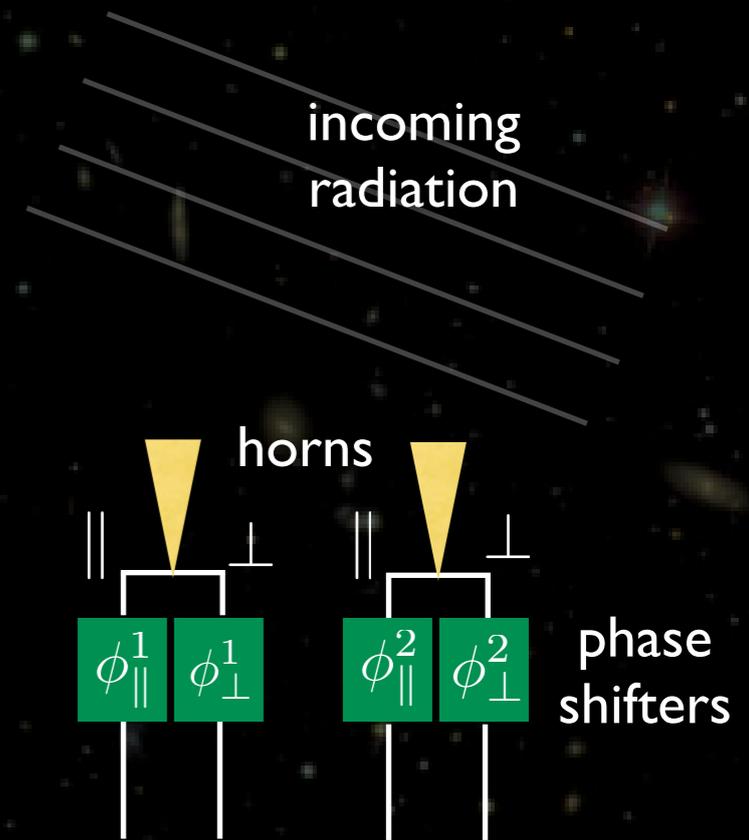
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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)



NB: MBI est un autre projet d'interféromètre bolométrique



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

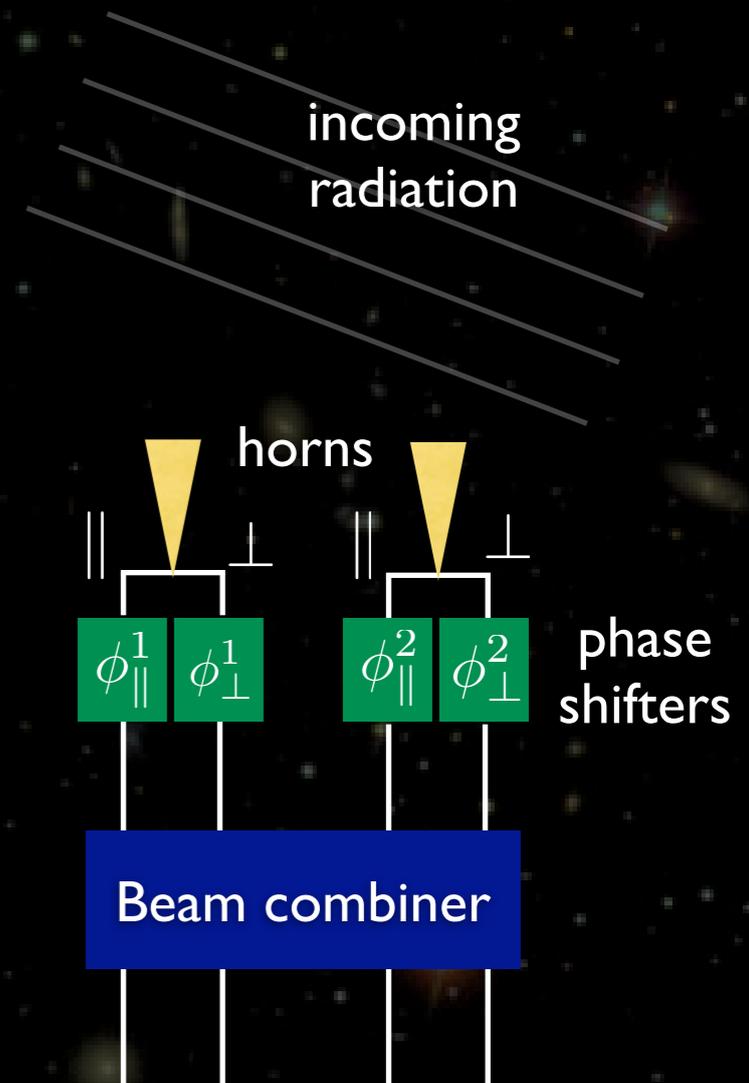
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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)



NB: MBI est un autre projet d'interféromètre bolométrique



Combiner les avantages : l'interférométrie bolométrique

- Interférométrie :

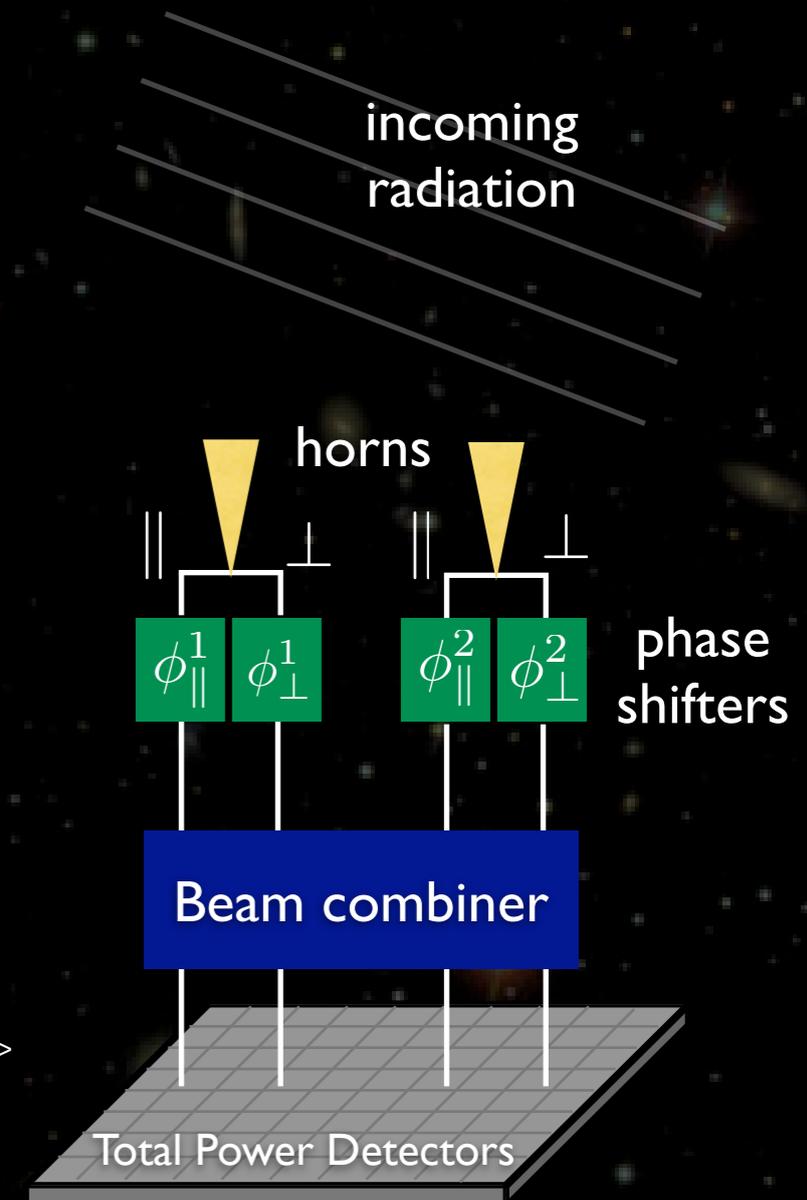
- Détection des franges d'interférence d'une onde EM
- Directement sensible aux corrélations spatiales du signal (TF)
- Pas besoin de cartes
- Pas de différences entre détecteurs

- 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)

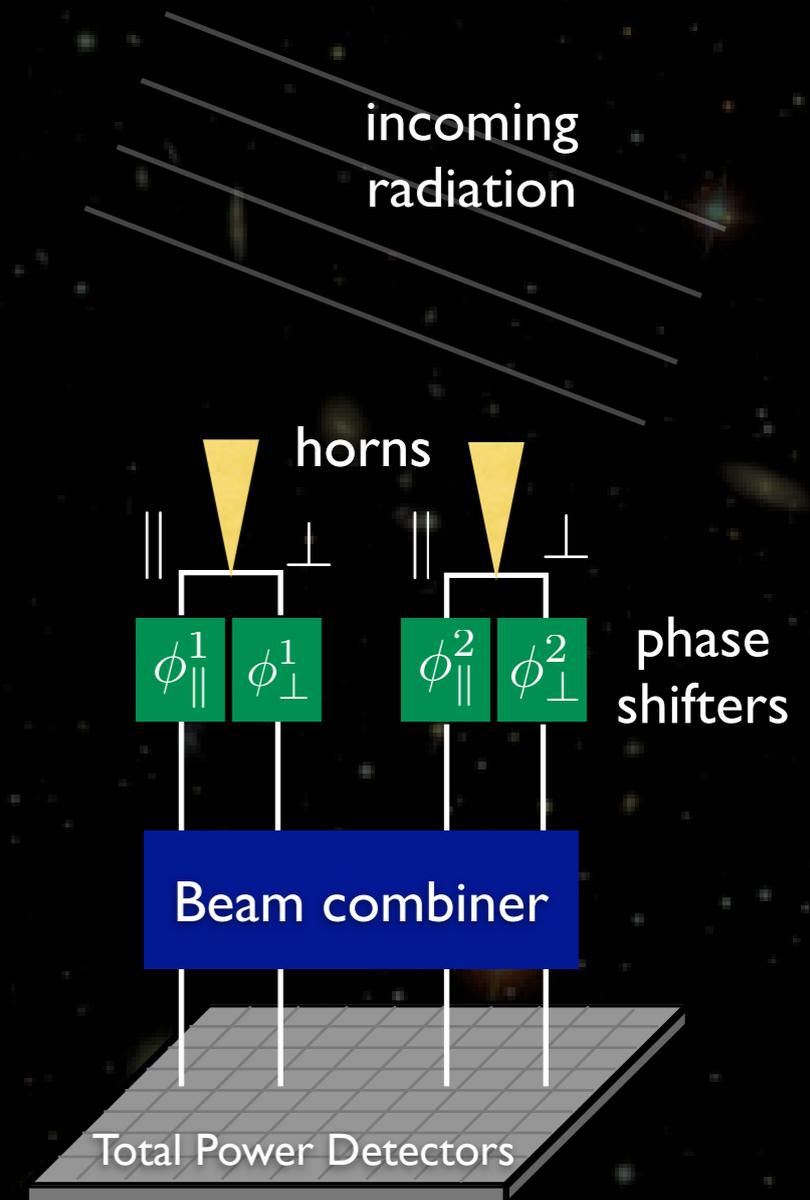


NB: MBI est un autre projet d'interféromètre bolométrique



Interférométrie bolométrique additive

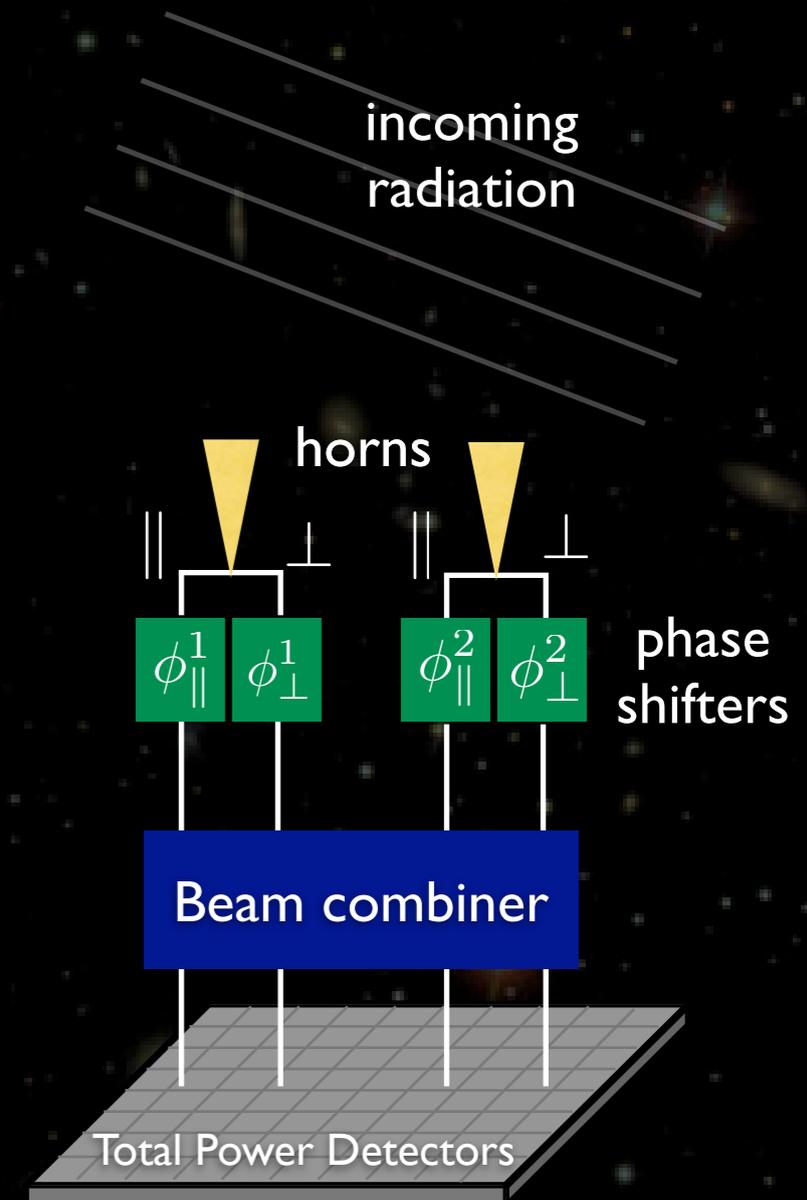
Champ provenant du canal i, α : $Z_{i, \alpha} = \int E_{i, \alpha}(\vec{n}) B(\vec{n}) d\vec{n} \exp [i\phi_{i, \alpha}]$



Interférométrie bolométrique additive

Champ provenant du canal i, α : $Z_{i, \alpha} = \int E_{i, \alpha}(\vec{n}) B(\vec{n}) d\vec{n} \exp [i\phi_{i, \alpha}]$

Signal mesuré $R_{i, j}^{\alpha, \beta} = |Z_{i, \alpha} + Z_{j, \beta}|^2$
 $= |Z_{i, \alpha}|^2 + |Z_{j, \beta}|^2 + 2\mathcal{R} [Z_{i, \alpha} Z_{j, \beta}^*]$



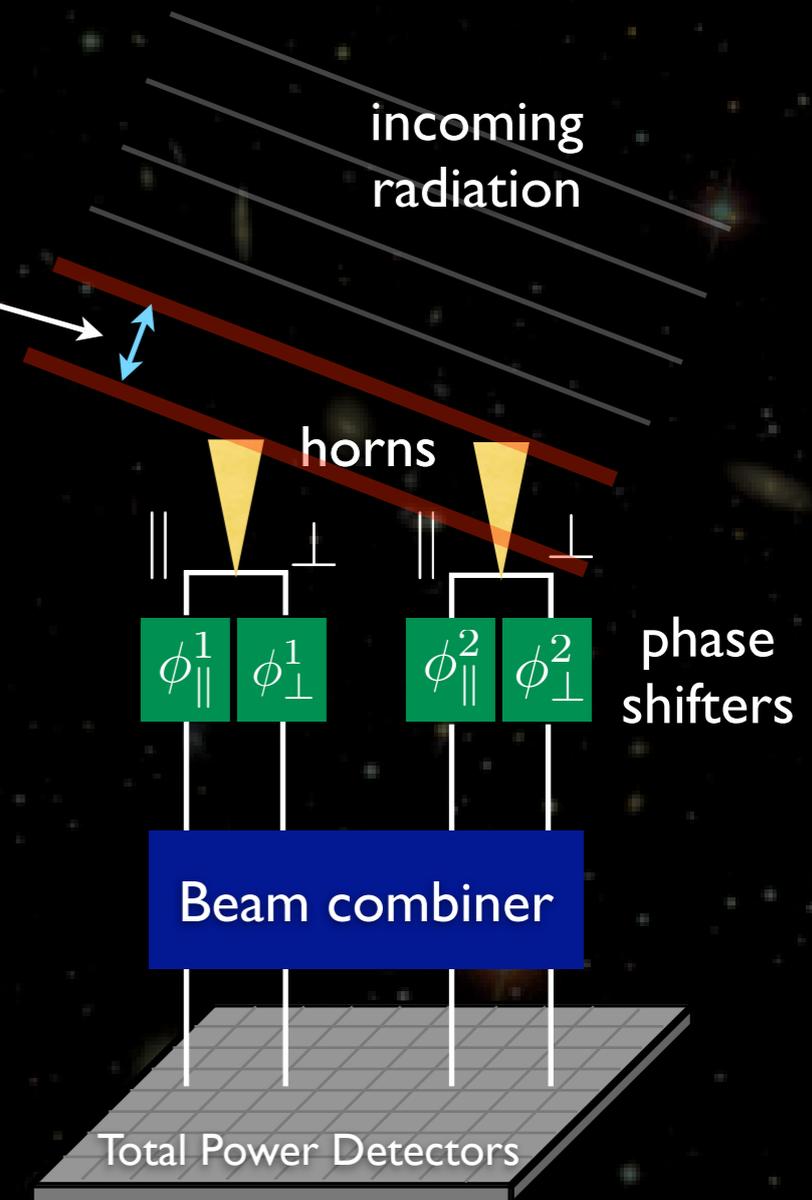
Interférométrie bolométrique additive

Champ provenant du canal i, α : $Z_{i,\alpha} = \int E_{i,\alpha}(\vec{n}) B(\vec{n}) d\vec{n} \exp [i\phi_{i,\alpha}]$

Signal mesuré $R_{i,j}^{\alpha,\beta} = |Z_{i,\alpha} + Z_{j,\beta}|^2$
 $= |Z_{i,\alpha}|^2 + |Z_{j,\beta}|^2 + 2\mathcal{R} [Z_{i,\alpha} Z_{j,\beta}^*]$

Différence de marche : $E_{j,\beta}(\vec{n}') = E_{i,\beta}(\vec{n}') \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{n})$

Incohérence des champ venant de directions différentes



Interférométrie bolométrique additive

Champ provenant du canal i, α : $Z_{i,\alpha} = \int E_{i,\alpha}(\vec{n}) B(\vec{n}) d\vec{n} \exp [i\phi_{i,\alpha}]$

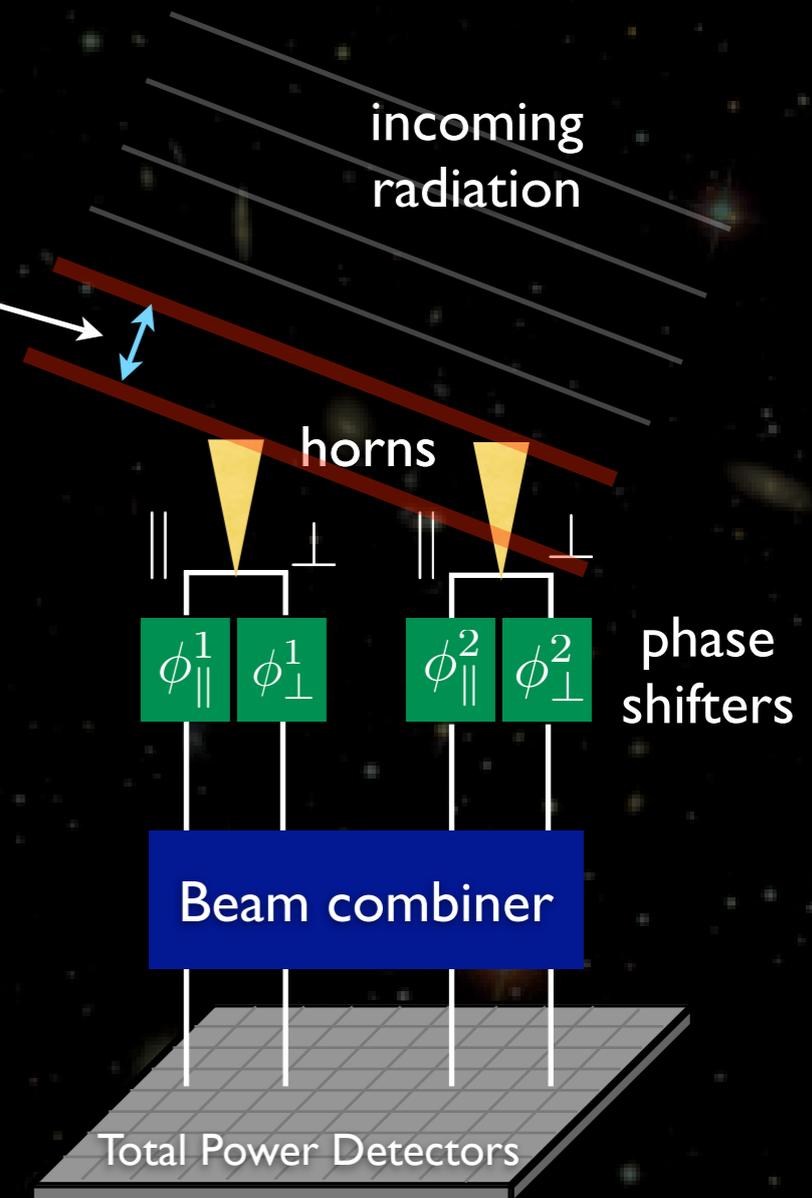
Signal mesuré $R_{i,j}^{\alpha,\beta} = |Z_{i,\alpha} + Z_{j,\beta}|^2$
 $= |Z_{i,\alpha}|^2 + |Z_{j,\beta}|^2 + 2\mathcal{R} [Z_{i,\alpha} Z_{j,\beta}^*]$

Différence de marche : $E_{j,\beta}(\vec{n}') = E_{i,\beta}(\vec{n}') \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{n})$

Incohérence des champ venant de directions différentes

$$Z_{i,\alpha} Z_{j,\beta}^* = \int E_{i,\alpha}(\vec{n}) E_{i,\beta}^*(\vec{n}) B^2(\vec{n}) \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{n}) d\vec{n} \exp(i\Delta\phi_{i,j}^{\alpha\beta})$$

(Définition de la visibilité : Transformée de Fourier du champ)



Interférométrie bolométrique additive

Champ provenant du canal i, α : $Z_{i,\alpha} = \int E_{i,\alpha}(\vec{n}) B(\vec{n}) d\vec{n} \exp[i\phi_{i,\alpha}]$

Signal mesuré $R_{i,j}^{\alpha,\beta} = |Z_{i,\alpha} + Z_{j,\beta}|^2$
 $= |Z_{i,\alpha}|^2 + |Z_{j,\beta}|^2 + 2\mathcal{R}[Z_{i,\alpha} Z_{j,\beta}^*]$

Différence de marche : $E_{j,\beta}(\vec{n}') = E_{i,\beta}(\vec{n}') \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{n})$

Incohérence des champ venant de directions différentes

$$Z_{i,\alpha} Z_{j,\beta}^* = \int E_{i,\alpha}(\vec{n}) E_{i,\beta}^*(\vec{n}) B^2(\vec{n}) \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{n}) d\vec{n} \exp(i\Delta\phi_{i,j}^{\alpha\beta})$$

(Définition de la visibilité : Transformée de Fourier du champ)

Signal pour 2 cornets (càd 1 baseline)

$$R_{i,j} = \sum_{\alpha,\beta} R_{i,j}^{\alpha,\beta}$$

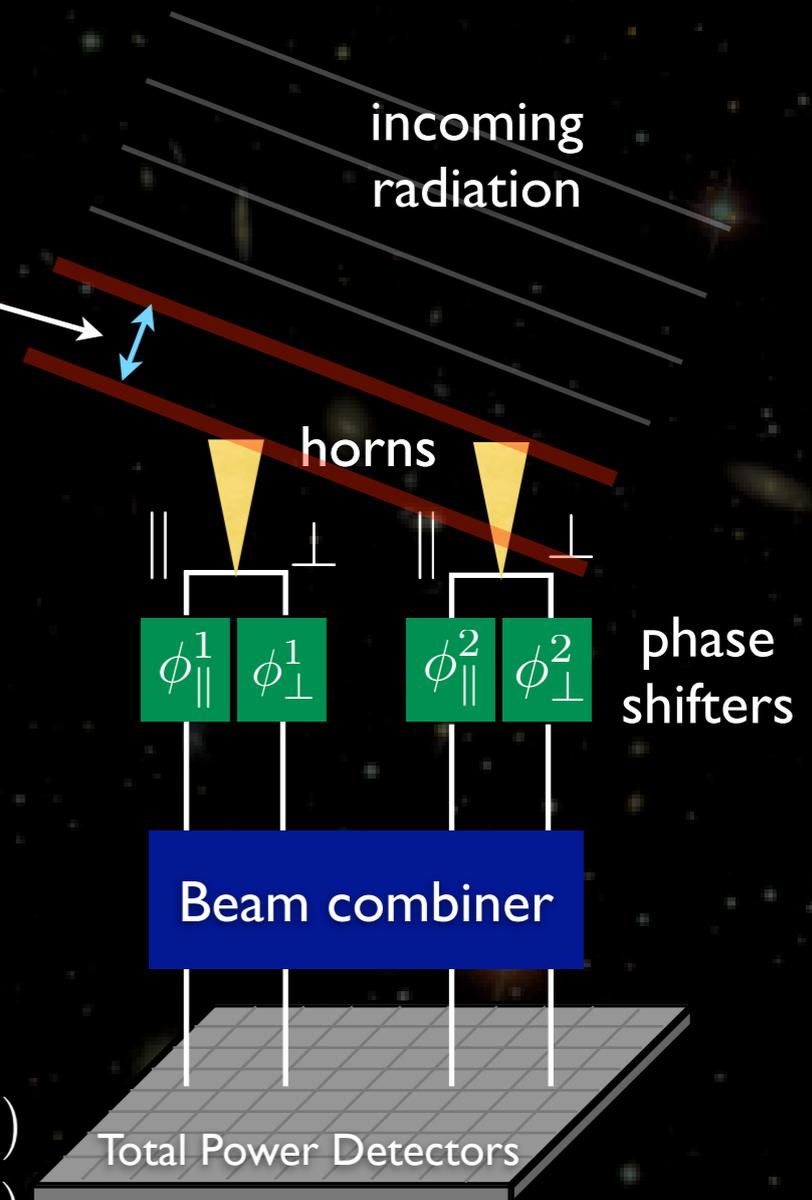
= Autocorrelation terms

$$+ \mathcal{R}[V_I] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\parallel} + \cos \Delta\phi_{\perp\perp}) - \mathcal{I}[V_I] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\parallel} + \sin \Delta\phi_{\perp\perp})$$

$$+ \mathcal{R}[V_Q] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\parallel} - \cos \Delta\phi_{\perp\perp}) - \mathcal{I}[V_Q] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\parallel} - \sin \Delta\phi_{\perp\perp})$$

$$+ \mathcal{R}[V_U] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\perp} + \cos \Delta\phi_{\perp\parallel}) - \mathcal{I}[V_U] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\perp} + \sin \Delta\phi_{\perp\parallel})$$

$$- \mathcal{R}[V_V] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\perp} - \sin \Delta\phi_{\perp\parallel}) - \mathcal{I}[V_V] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\perp} - \cos \Delta\phi_{\perp\parallel})$$



Interférométrie bolométrique additive

Champ provenant du canal i,a : $Z_{i,\alpha} = \int E_{i,\alpha}(\vec{n}) B(\vec{n}) d\vec{n} \exp [i\phi_{i,\alpha}]$

Signal mesuré $R_{i,j}^{\alpha,\beta} = |Z_{i,\alpha} + Z_{j,\beta}|^2$
 $= |Z_{i,\alpha}|^2 + |Z_{j,\beta}|^2 + 2\mathcal{R} [Z_{i,\alpha} Z_{j,\beta}^*]$

Différence de marche : $E_{j,\beta}(\vec{n}') = E_{i,\beta}(\vec{n}') \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{n})$

Incohérence des champ venant de directions différentes

$$Z_{i,\alpha} Z_{j,\beta}^* = \int E_{i,\alpha}(\vec{n}) E_{i,\beta}^*(\vec{n}) B^2(\vec{n}) \exp(2i\pi\vec{u} \cdot \vec{n}) d\vec{n} \exp(i\Delta\phi_{i,j}^{\alpha\beta})$$

(Définition de la visibilité : Transformée de Fourier du champ)

Signal pour 2 cornets (càd 1 baseline)

$$R_{i,j} = \sum_{\alpha,\beta} R_{i,j}^{\alpha,\beta}$$

= Autocorrelation terms

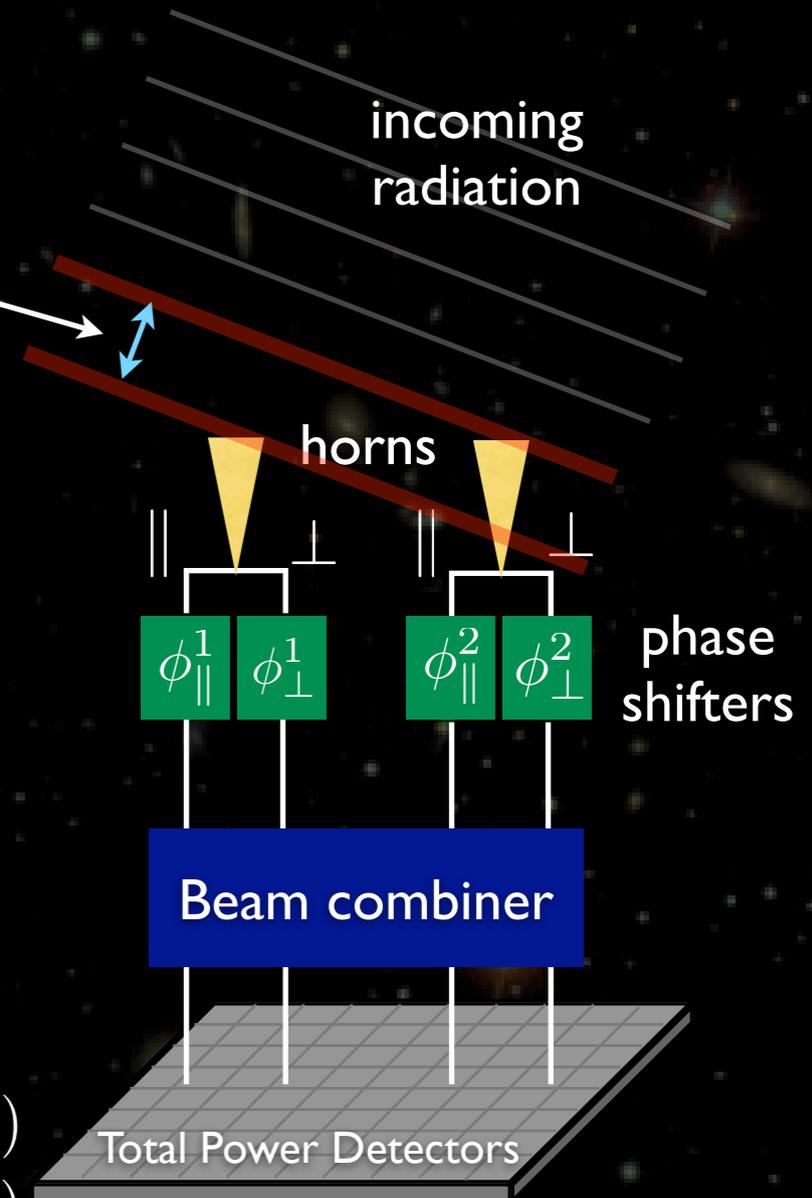
$$+\mathcal{R} [V_I] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\parallel} + \cos \Delta\phi_{\perp\perp}) - \mathcal{I} [V_I] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\parallel} + \sin \Delta\phi_{\perp\perp})$$

$$+\mathcal{R} [V_Q] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\parallel} - \cos \Delta\phi_{\perp\perp}) - \mathcal{I} [V_Q] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\parallel} - \sin \Delta\phi_{\perp\perp})$$

$$+\mathcal{R} [V_U] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\perp} + \cos \Delta\phi_{\perp\parallel}) - \mathcal{I} [V_U] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\perp} + \sin \Delta\phi_{\perp\parallel})$$

$$-\mathcal{R} [V_V] \times (\sin \Delta\phi_{\parallel\perp} - \sin \Delta\phi_{\perp\parallel}) - \mathcal{I} [V_V] \times (\cos \Delta\phi_{\parallel\perp} - \cos \Delta\phi_{\perp\parallel})$$

Visibilités (complexes) des 4 paramètres de Stokes !!



BRAIN

B-mode RAdiation INterferometer

- *France*

- Astroparticule et Cosmologie (APC), Paris
- Centre d'Étude Spatiale de Rayonnements (CESR), Toulouse
- Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse (CSNSM), Orsay
- Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS), Orsay

- *Italie*

- Università di Milano - Bicocca
- Università di Roma - La sapienza

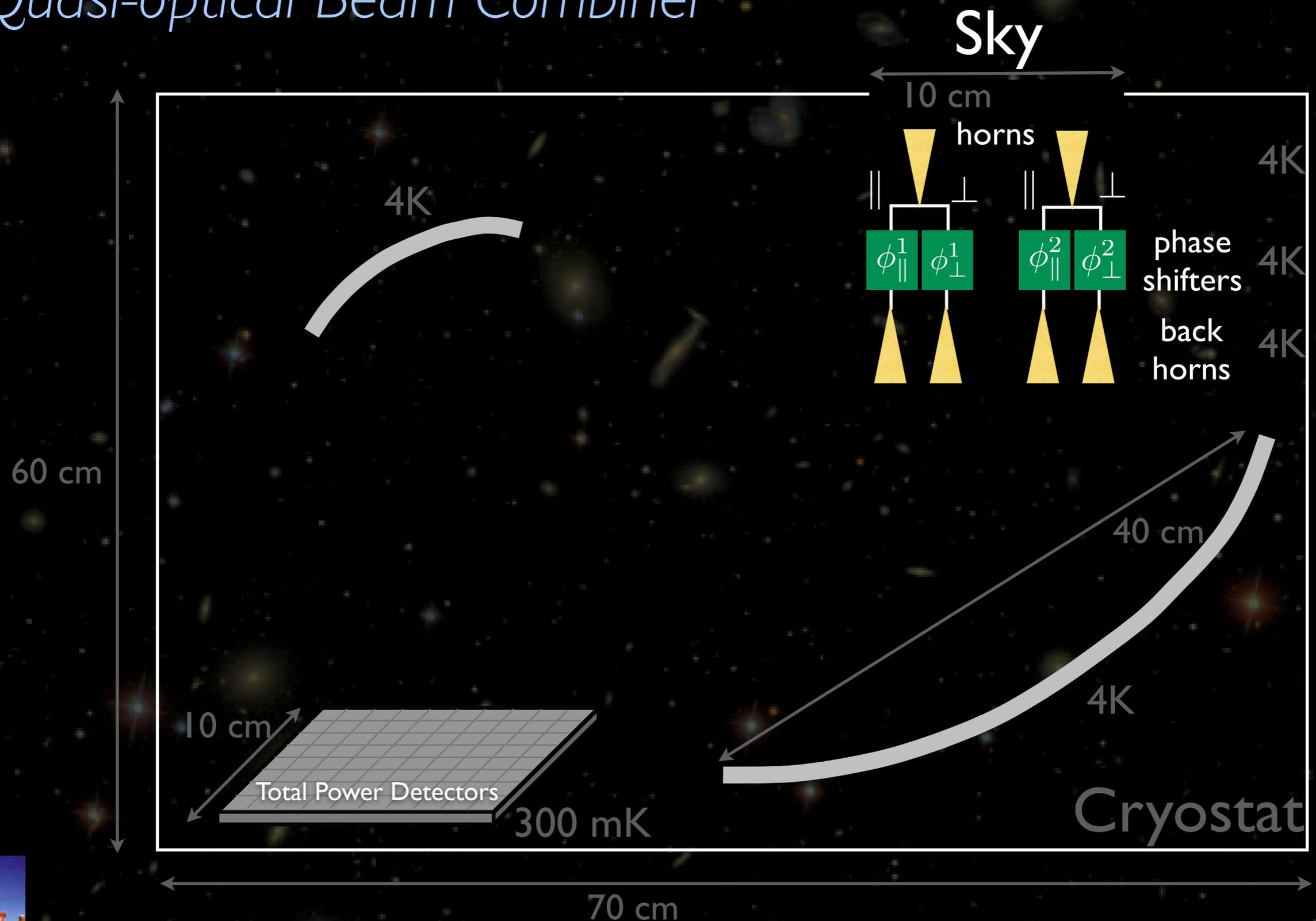
- *Grande Bretagne*

- University of Manchester
- University of Wales - Cardiff



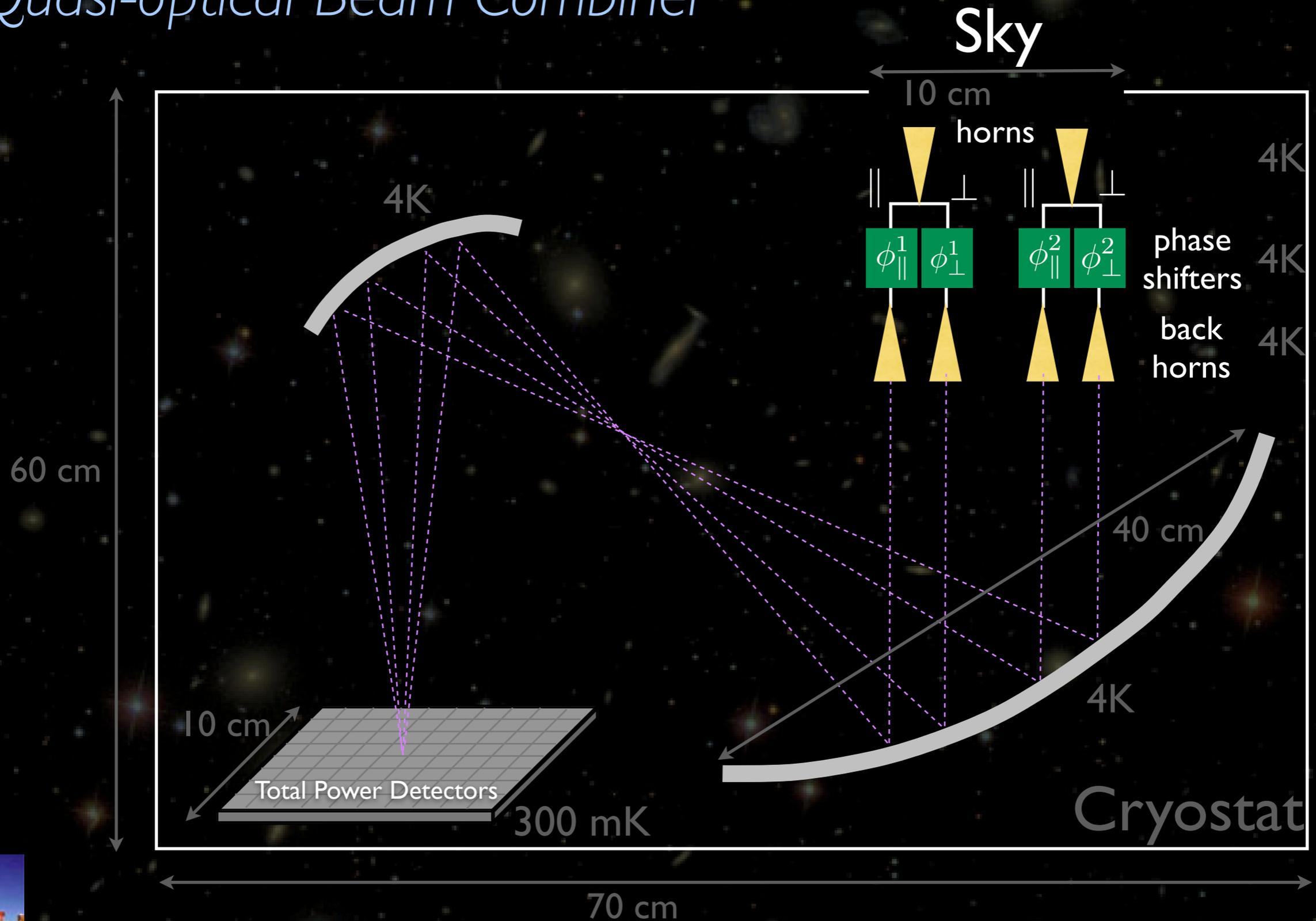
Le concept de BRAIN

- *Quasi-optical Beam Combiner*



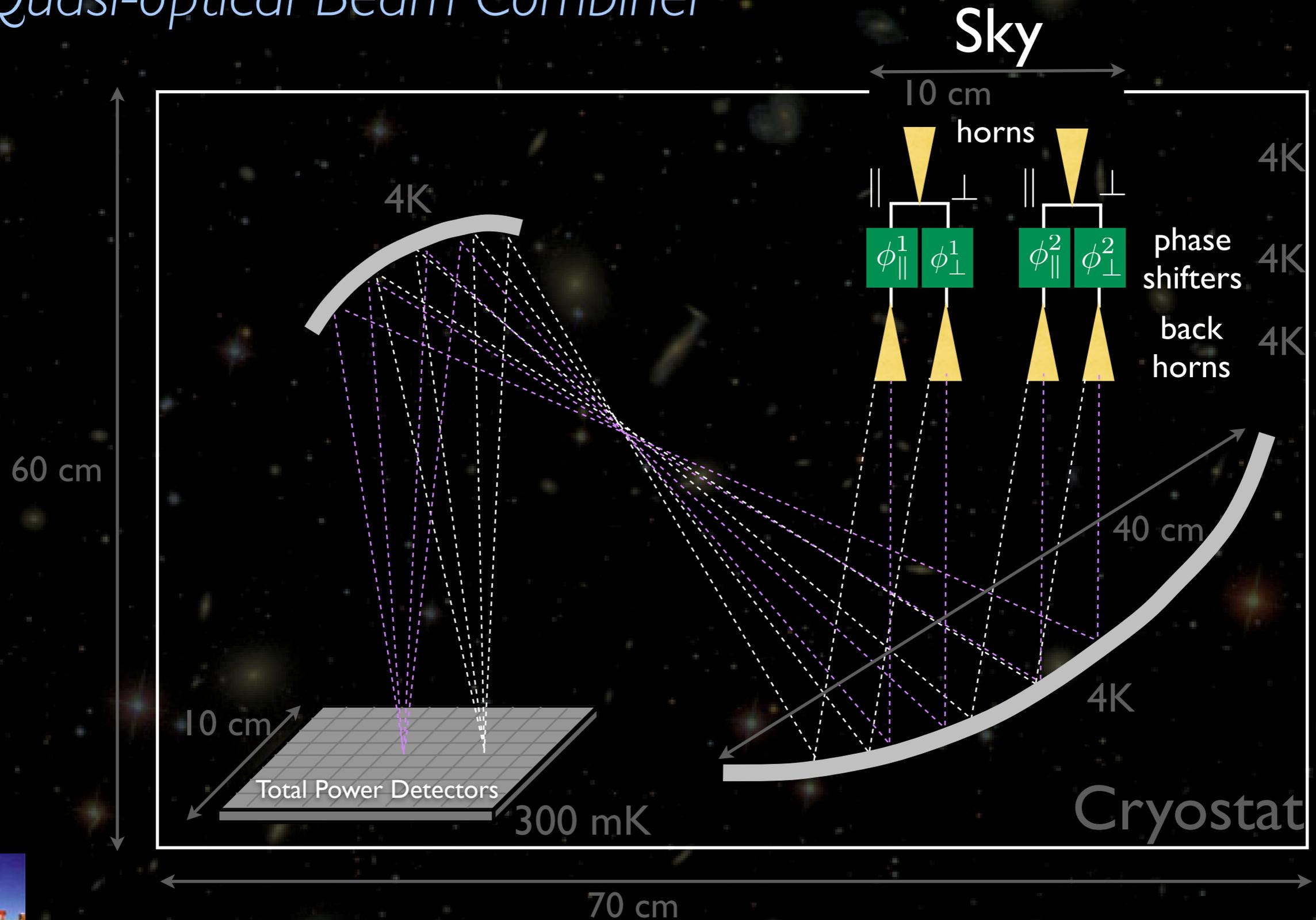
Le concept de BRAIN

- *Quasi-optical Beam Combiner*



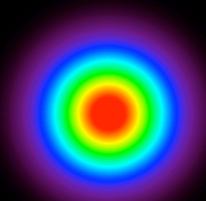
Le concept de BRAIN

- *Quasi-optical Beam Combiner*

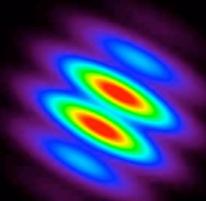


Quasi Optical Combiner

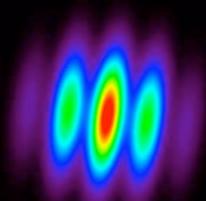
- *Les images de tous les cornets sont superposées sur la matrice de bolomètres*
- *On forme des franges d'interférence*



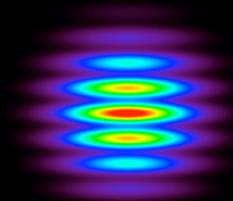
1 cornet



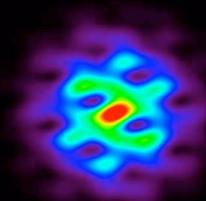
1 ligne de base



1 ligne de base



1 ligne de base

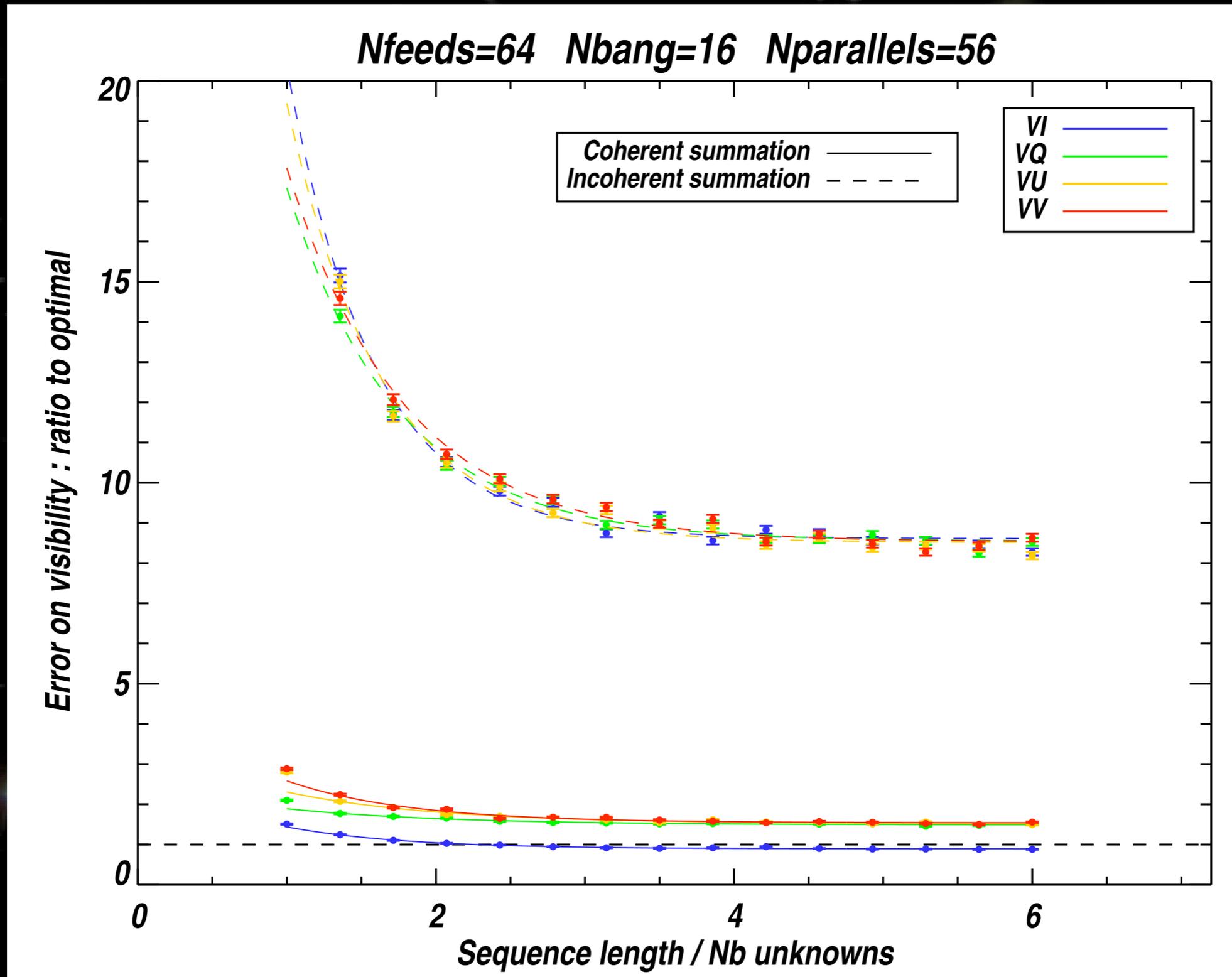


signal final

- *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**



Reconstruction des visibilité



recherches suborbitales de modes B

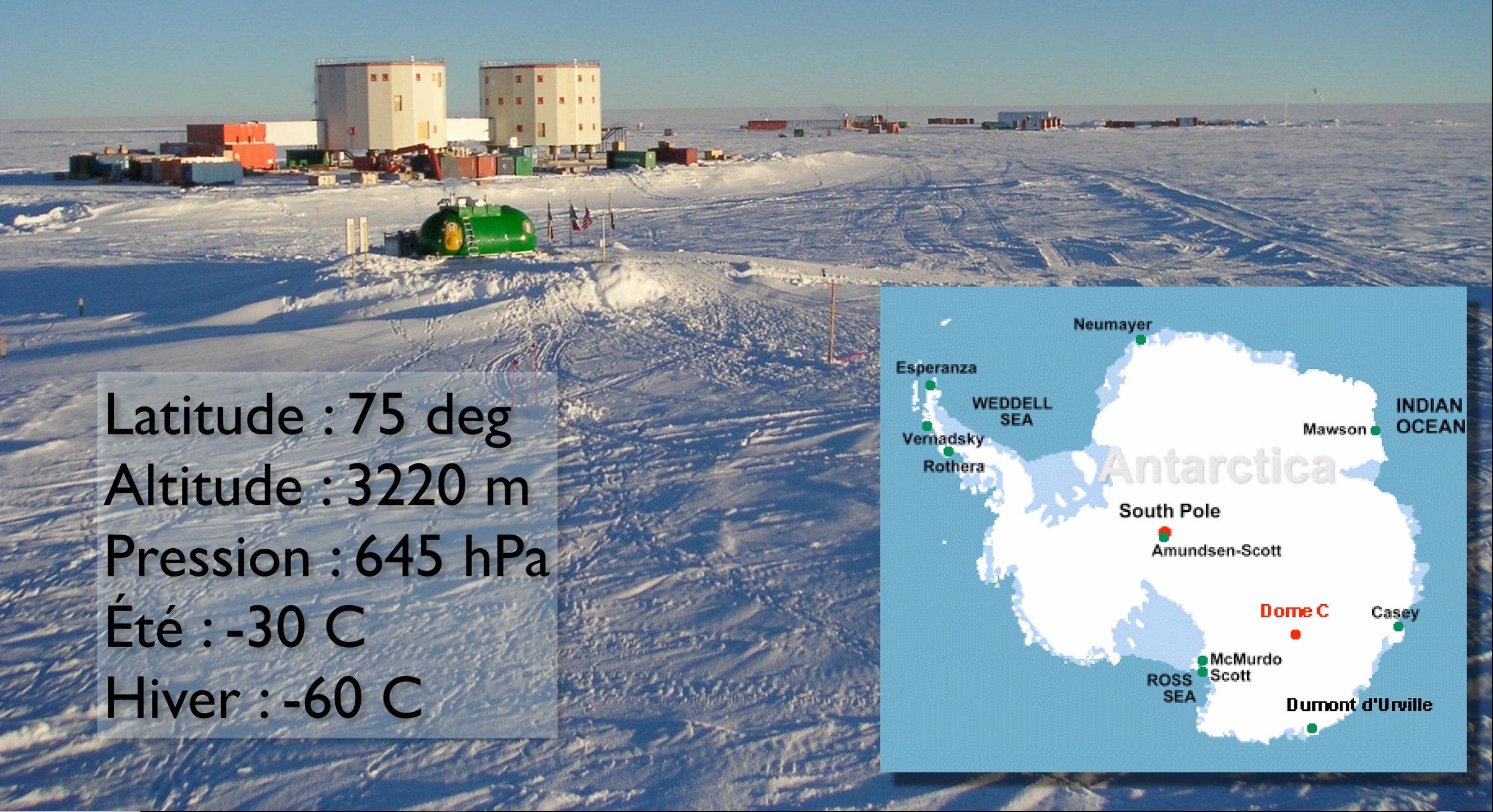
- *NB : pas de mission satellite ESA ou NASA prévue*
- *Pôle Sud :*
 - QUAD [arXiv:0705.2359]
 - BICEP / SPUD [arXiv:astro-ph/0606278]
- *Atacama, Chili :*
 - Clover [arXiv:astro-ph/0407148]
 - QUIET [arXiv:0802.2657]
- *Ballons :*
 - EBEX [arXiv:astro-ph/0501111]
 - Spider [arXiv:0710.0375]

Uniquement des imageurs
Sites extrêmement “propres”





Dôme C : le meilleur site du monde ?



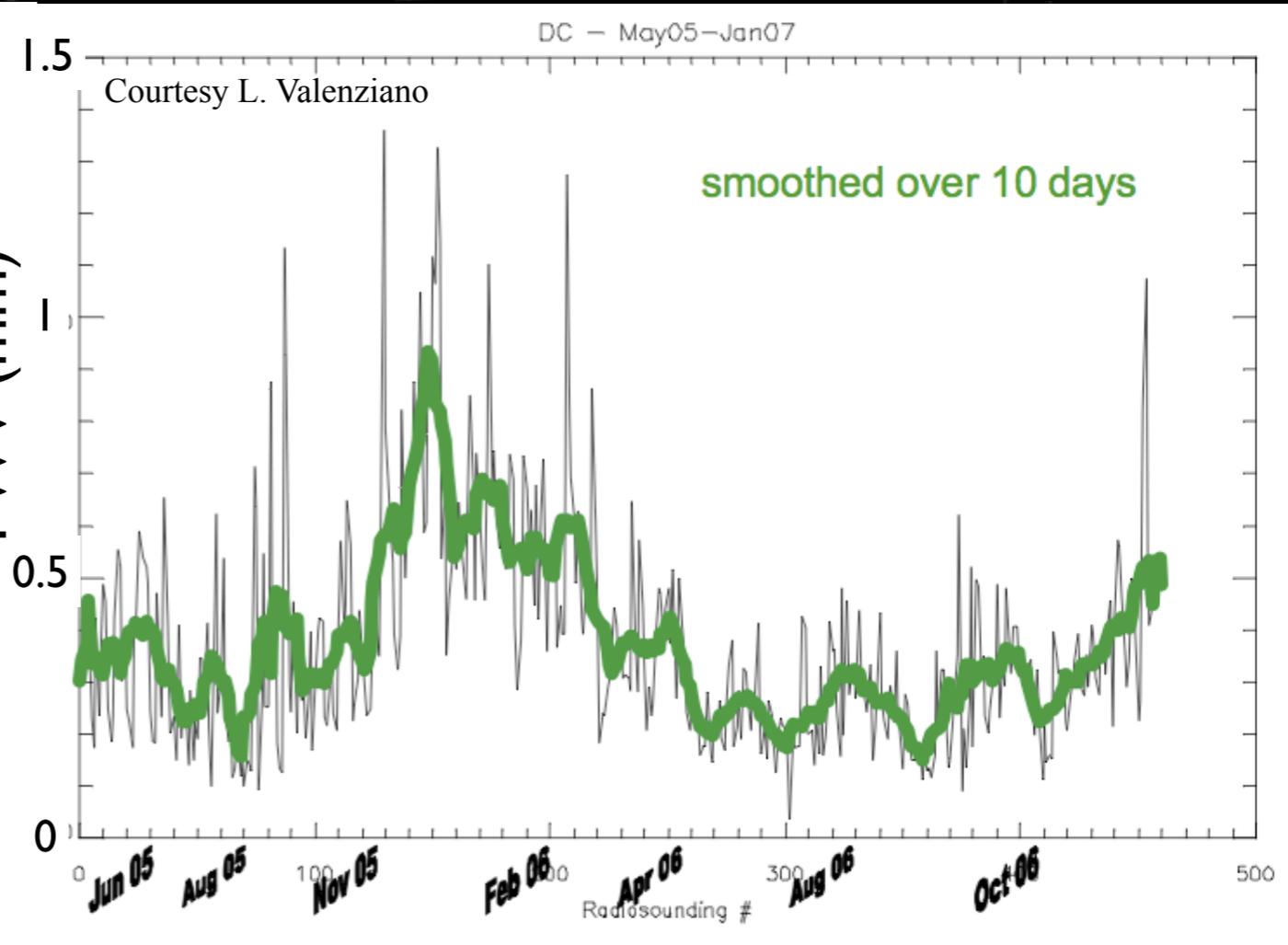
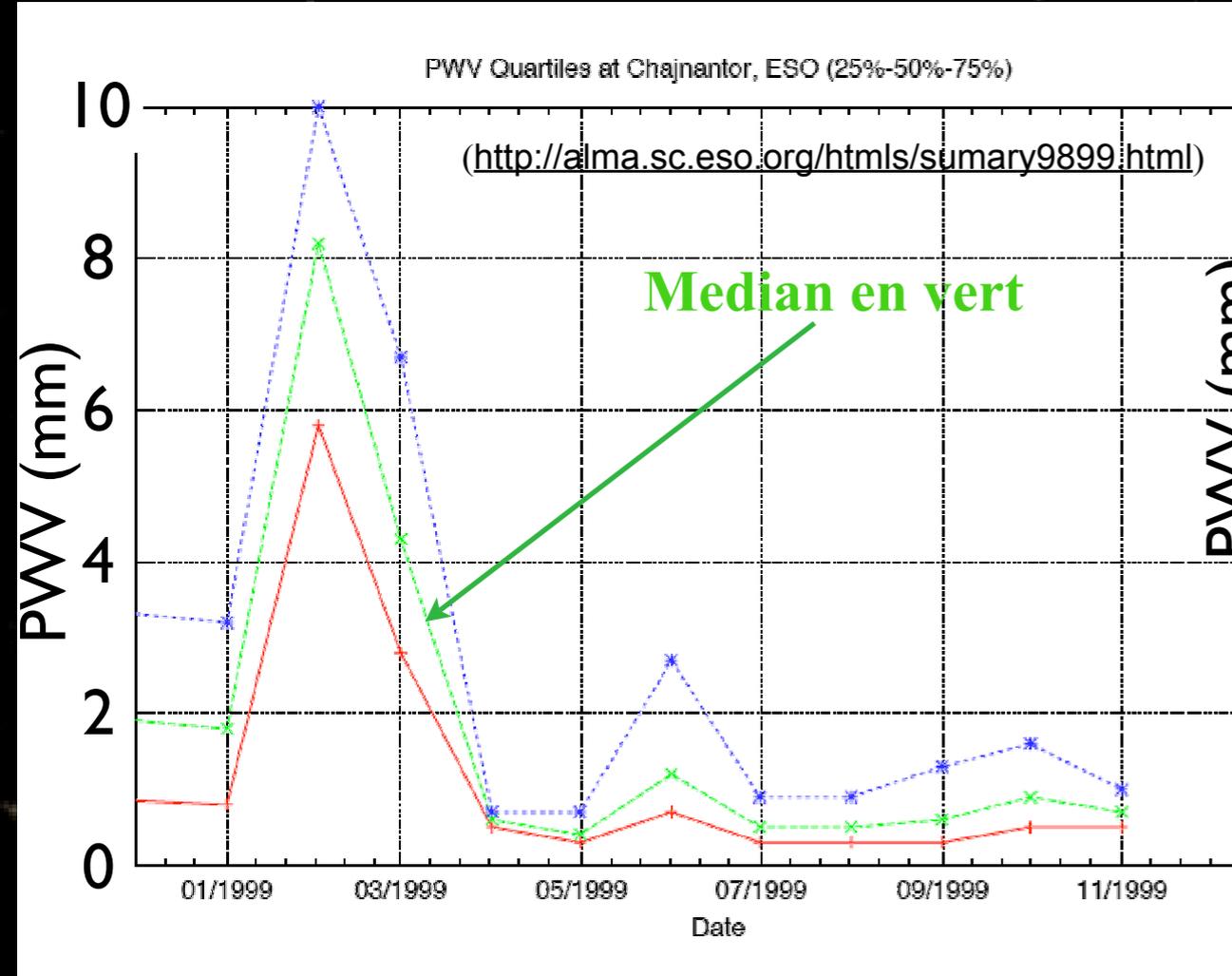
Latitude : 75 deg
Altitude : 3220 m
Pression : 645 hPa
Été : -30 C
Hiver : -60 C



Precipitable Water Vapor

Chajnantor (Chili)

Dôme C (Antarctique)



PWV < 0.5 mm
 ~50% du temps en hiver

PWV < 0.5 mm
 100% du temps en hiver

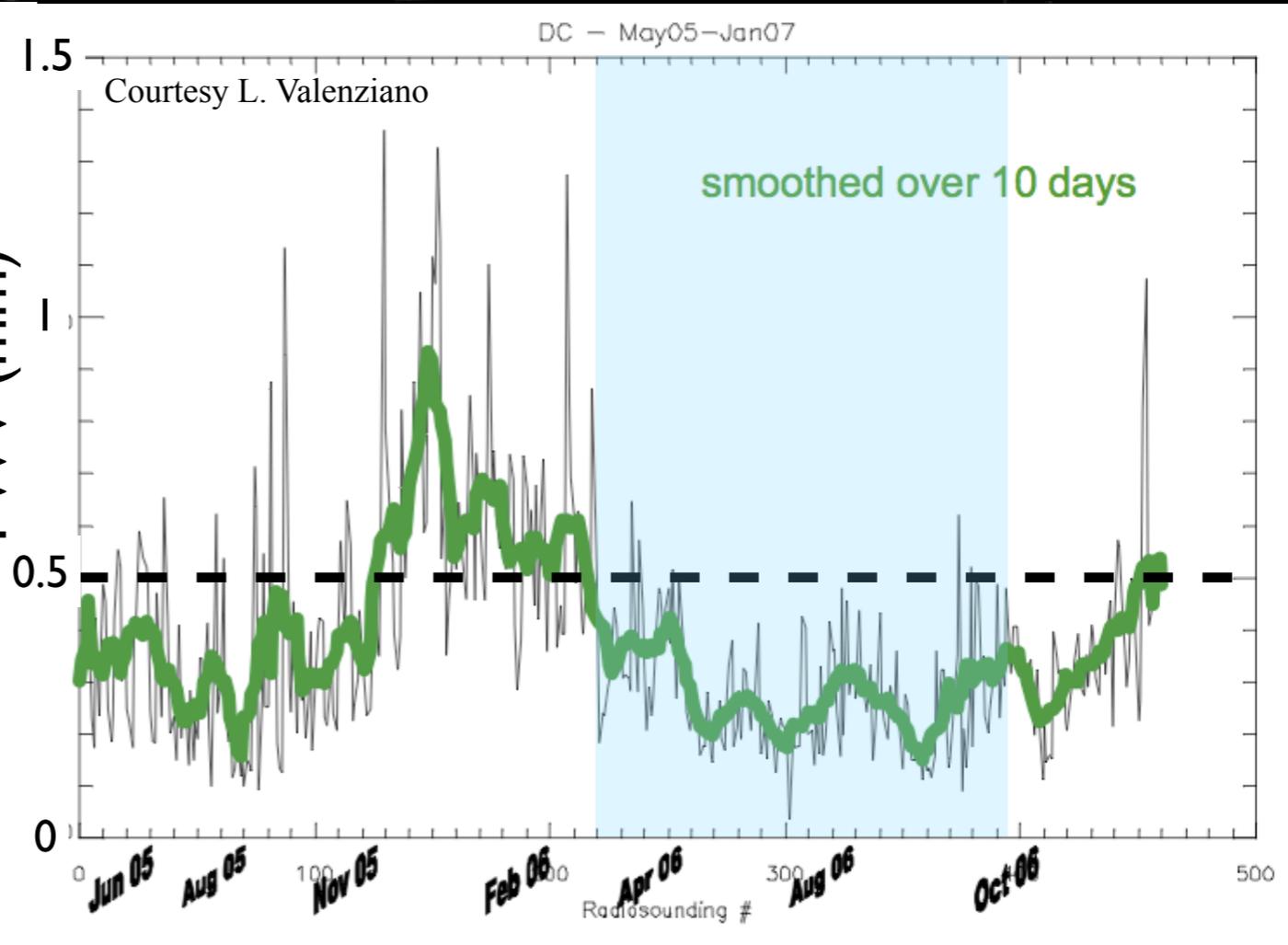
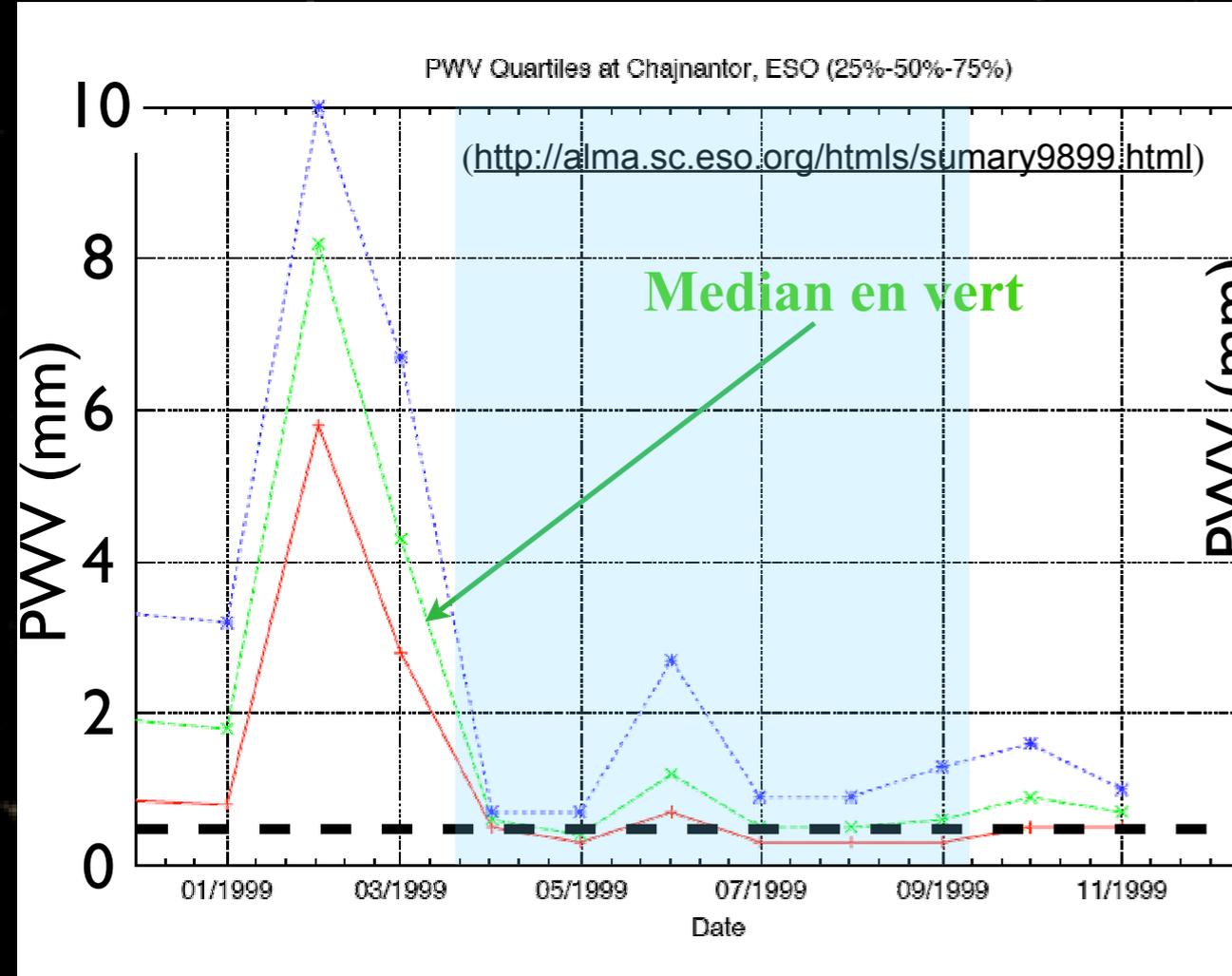
la différence est encore plus importante en été



Precipitable Water Vapor

Chajnantor (Chili)

Dôme C (Antarctique)



PWV < 0.5 mm

~50% du temps en hiver

PWV < 0.5 mm

100% du temps en hiver

la différence est encore plus importante en été



température équivalente de l'atmosphère

- 150 GHz, largeur de bande 30%

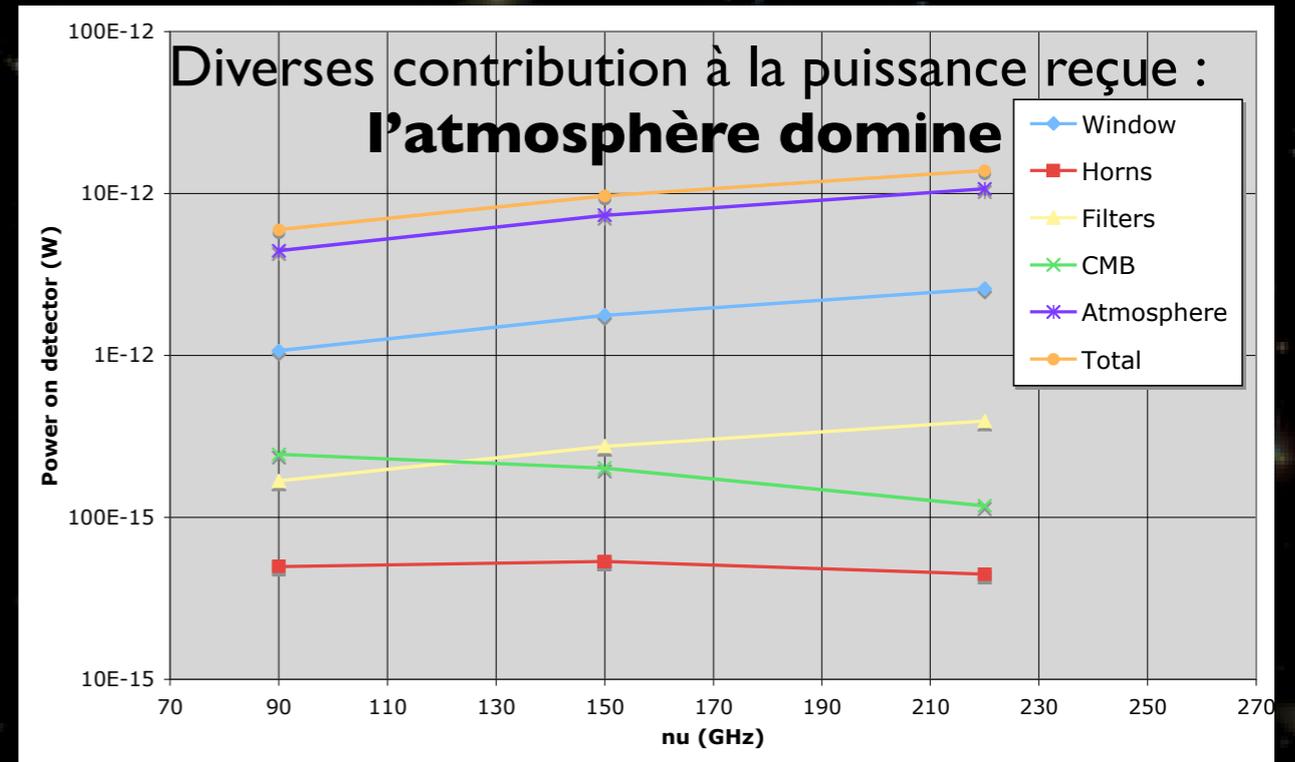
| Site | T_{atm} |
|--------------------------------|------------------|
| Chajnantor zenith | 16.5 K |
| Chajnantor $\theta=45$ deg. | 21.4 K |
| Dôme C zenith | 14 K |

$$NEP^2 \simeq 2h\nu P_{\text{back}} \propto T_{\text{atm}}$$

réduction de T_{atm} par 1/3



réduction du temps d'intégration 1/3
+facteur ~0.5 car PWV < 1mm ~365j/an



- le Dôme C permet d'observer 24h/24 la zone la plus propre du ciel à haute élévation.
- Longues nuits en hiver, Soleil bas en été
- Comparaison avec le Pôle Sud :
 - Latitude 75deg => plus de croisements dans la stratégie de scan
 - Plus froid et moins de vent
 - atmosphère plus stable, moins d'activité humaine autour ...



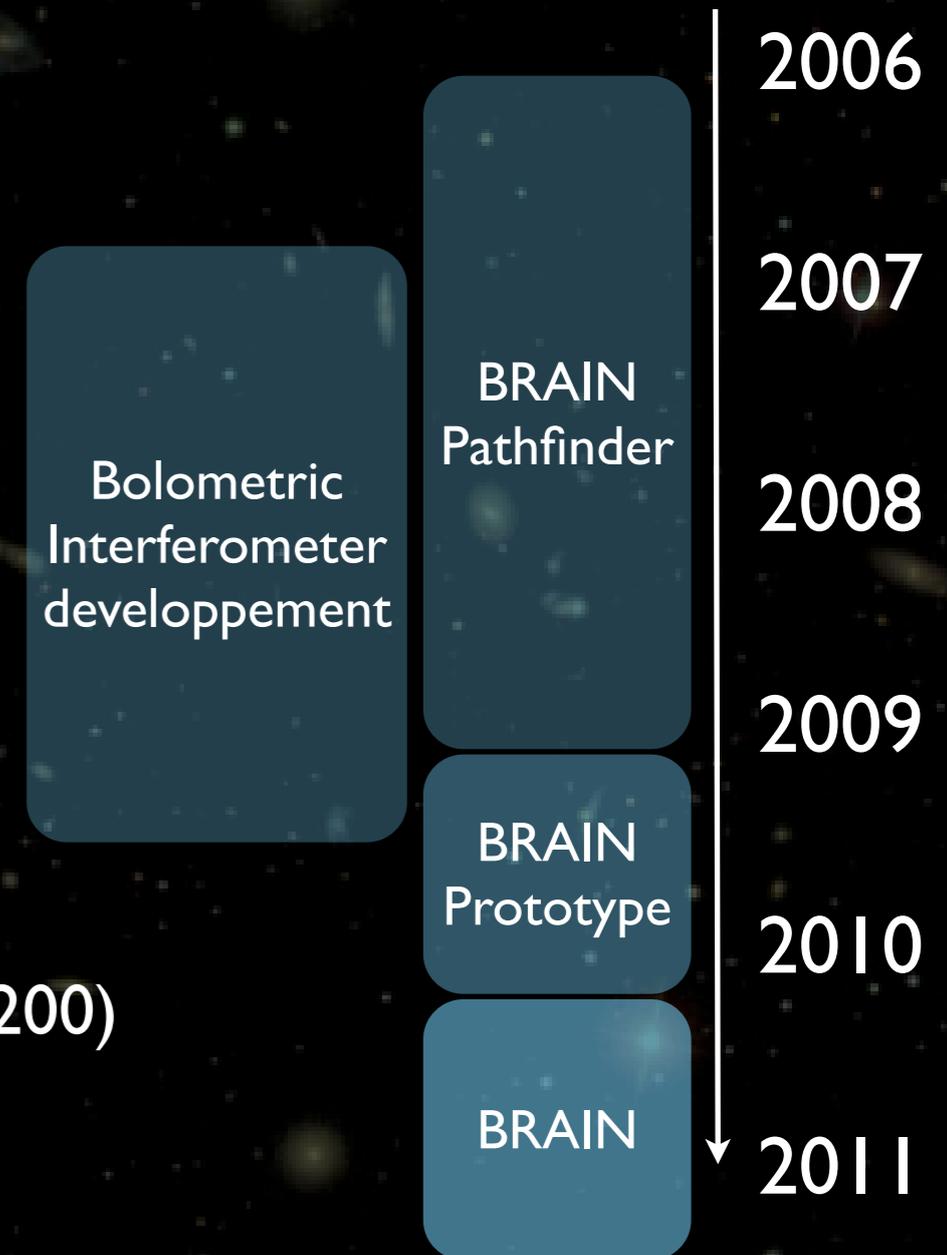
le programme BRAIN

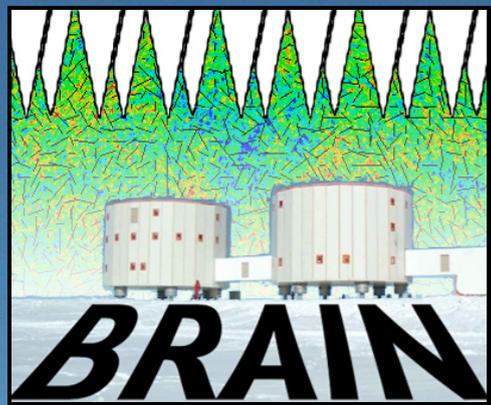
- Pathfinder

- Test du site, logistique : imageur
- Caractérisation de l'atmosphère
- Première installation : janvier 2006
 - 370 mK au Dôme C
 - Premières données à 150 GHz
- Seconde campagne en janvier 2007
 - 1 mois d'observations

- BRAIN

- Recherche des modes B primordiaux ($50 < l < 200$)
- Interféromètre bolométrique
- 10 modules de 144 cornets (90, 150, 220 GHz)
- Instrument complet ~ 2010-2011
- Objectif : $r \sim 0.01$ avec un an de données



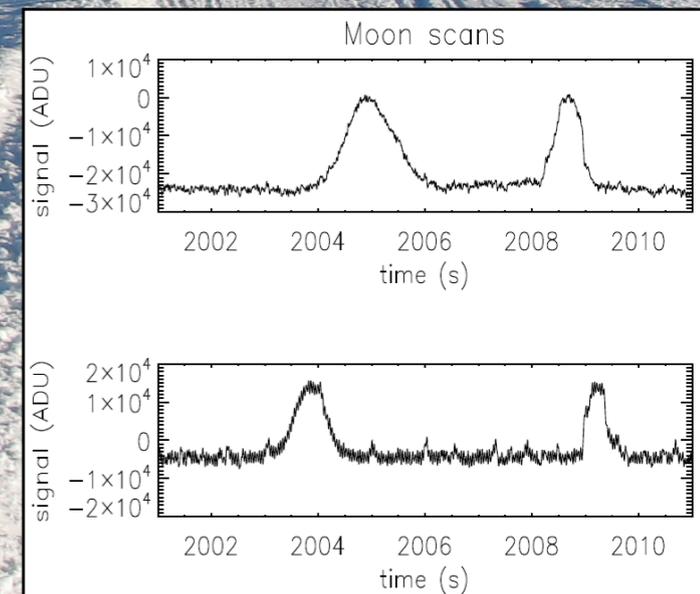
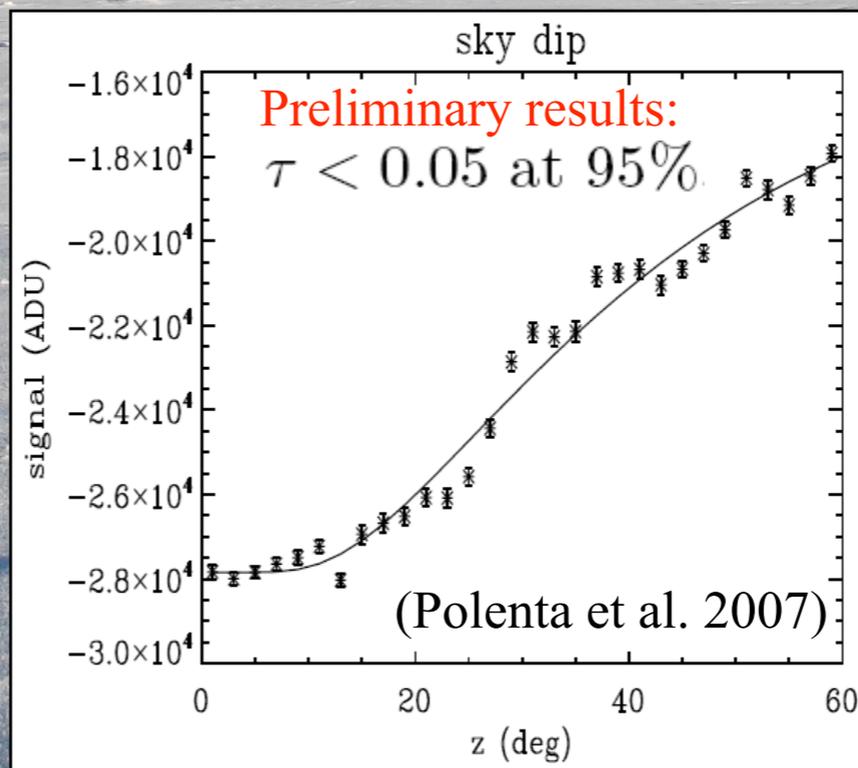
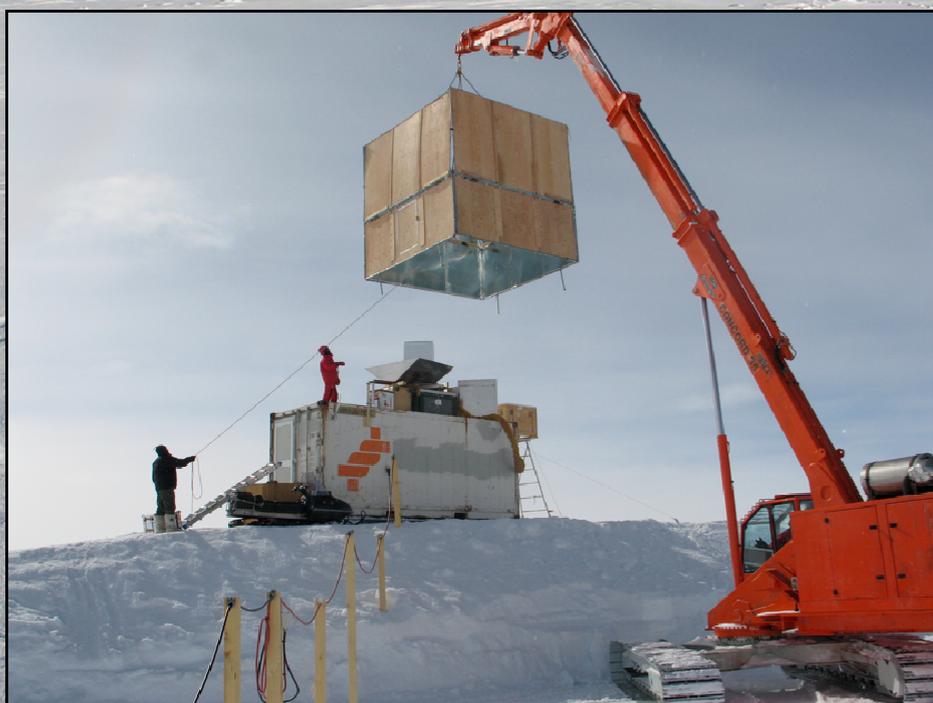


Pathfinder

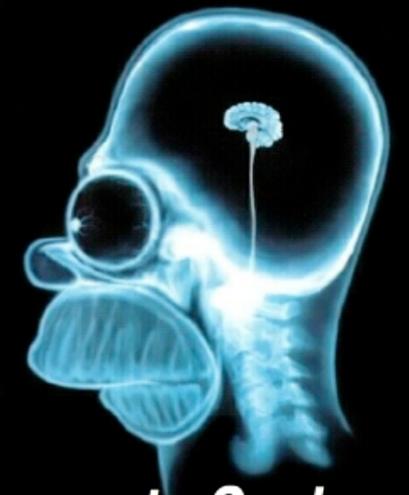


- Observations done:
- Sky dips
 - Moon
 - CMB

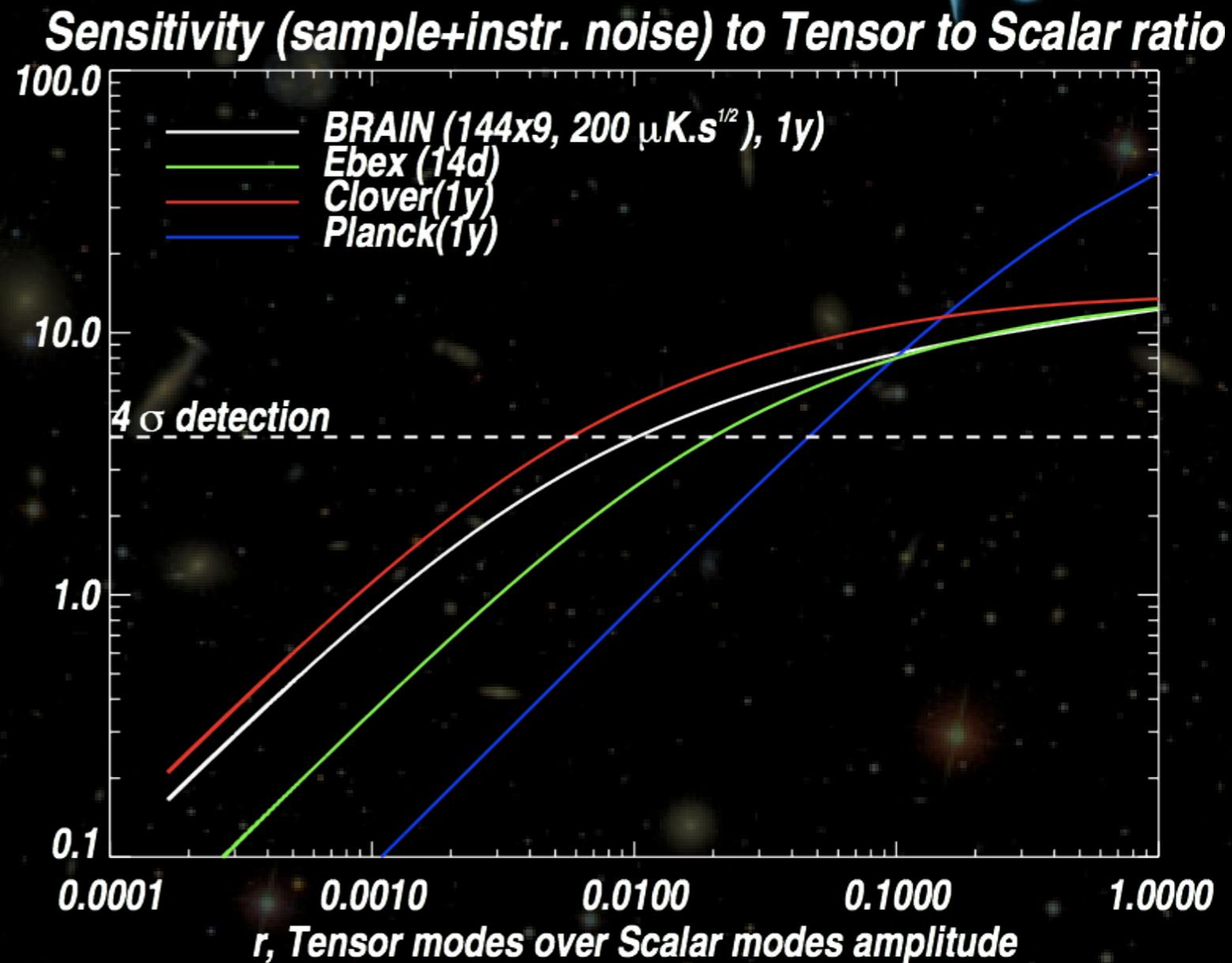
(Dec. 11th 2006)



Brain “Full Size”



- 9 modules de 12x12 cornets
 - ~ 10000 baselines / module
- 3 bandes de fréquence
 - 90, 150, 220 GHz
- Lobe principal : 20 deg.
- multipoles [50 , 200]
- Opérations continues au Dome C



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



Conclusions et perspectives

- *La mise en évidence des modes-B aurait un impact majeur en cosmologie*
 - Inflation, contrainte sur les théories de cordes
- *L'interférométrie bolométrique semble être une option intéressante*
 - Peu d'effets systématiques
 - sensibilité équivalente à celle d'un imageur
- *BRAIN utilisera cette technique au Dôme C*
 - Les données du pathfinder (entre autres) indiquent que ce site est exceptionnel
- *BRAIN sera installé ~2010-2011 et permettra de contraindre $r=0.01$ avec 1 an de données*

