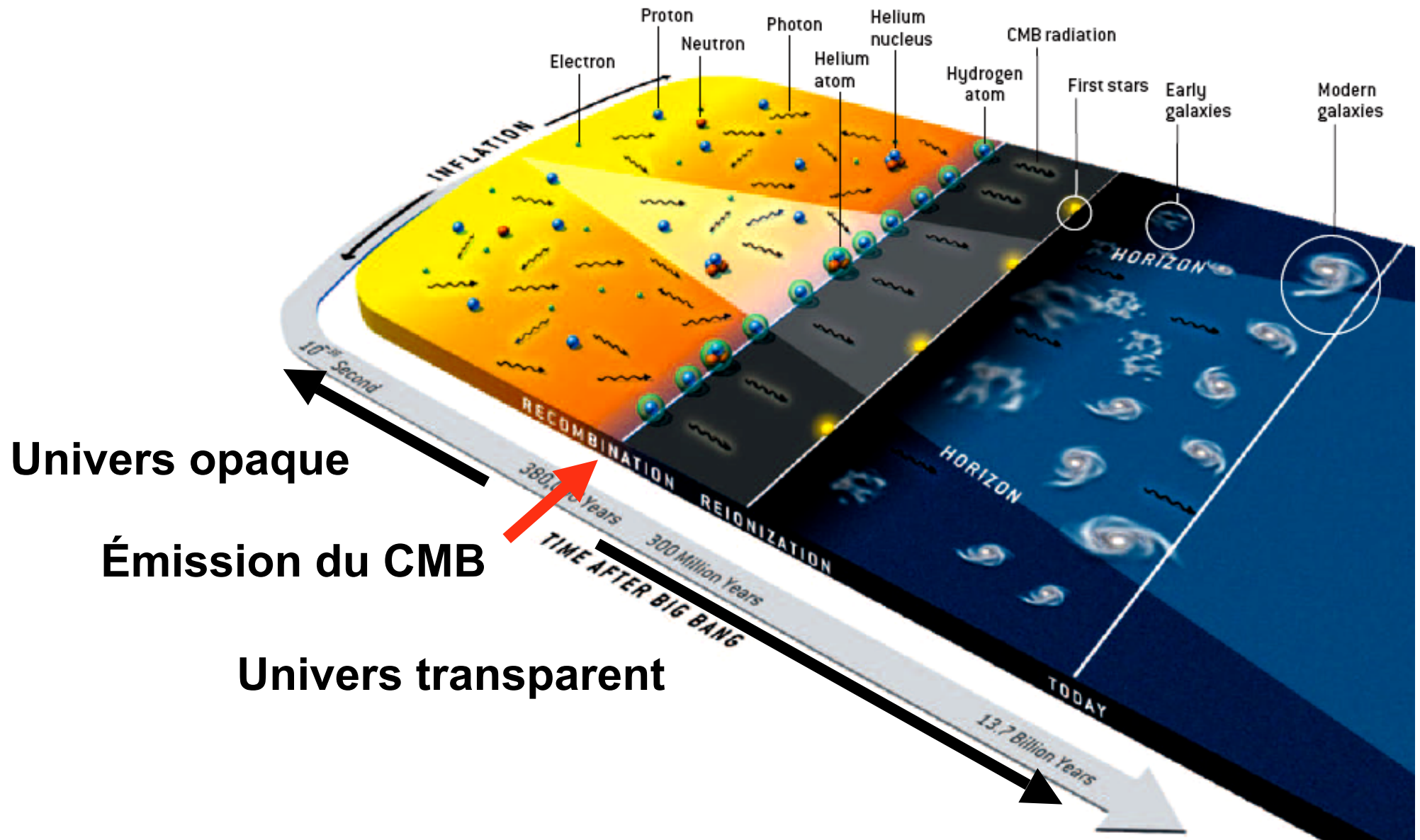

Le futur du fond diffus cosmologique

-

La mesure de la polarisation

Cyrille Rosset

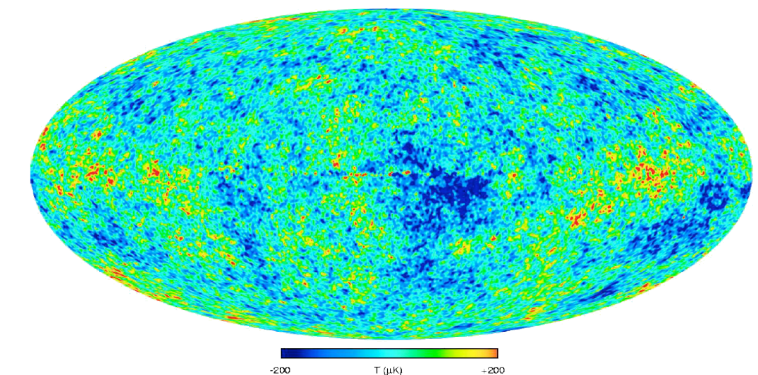
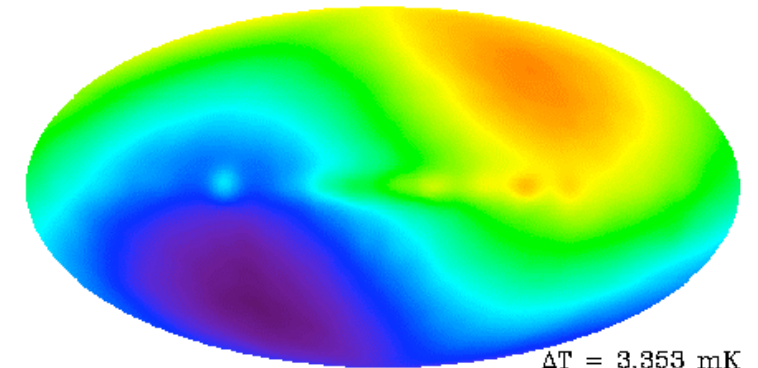
Modèle du Big Bang



Caractéristiques du CMB

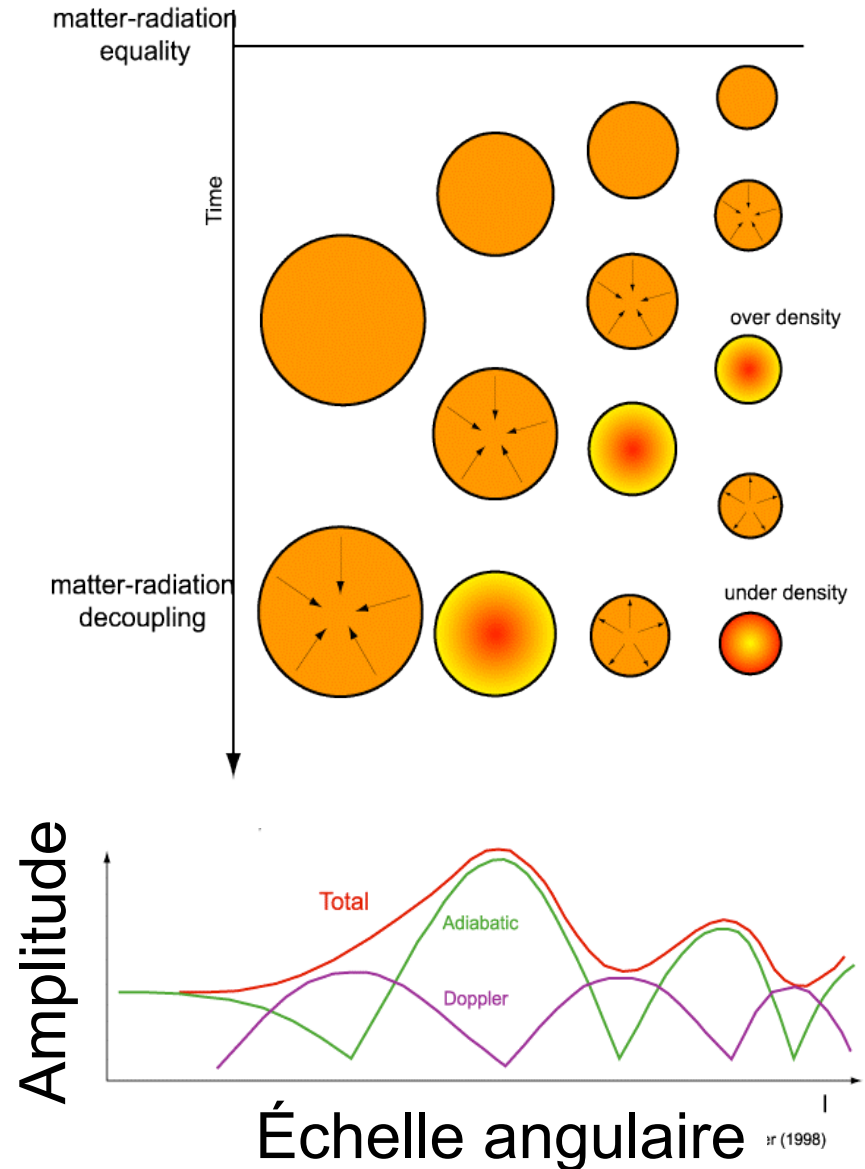
- Spectre de corps noir
- Température très uniforme ($\Delta T/T < 10^{-5}$)
- Dipôle (effet Doppler)
- Anisotropies :
 - Traces des fluctuations de densité au découplage
 - Statistique dépend du contenu de l'Univers
- Physique simple : prédictions !

(COBE/DMR homepage)

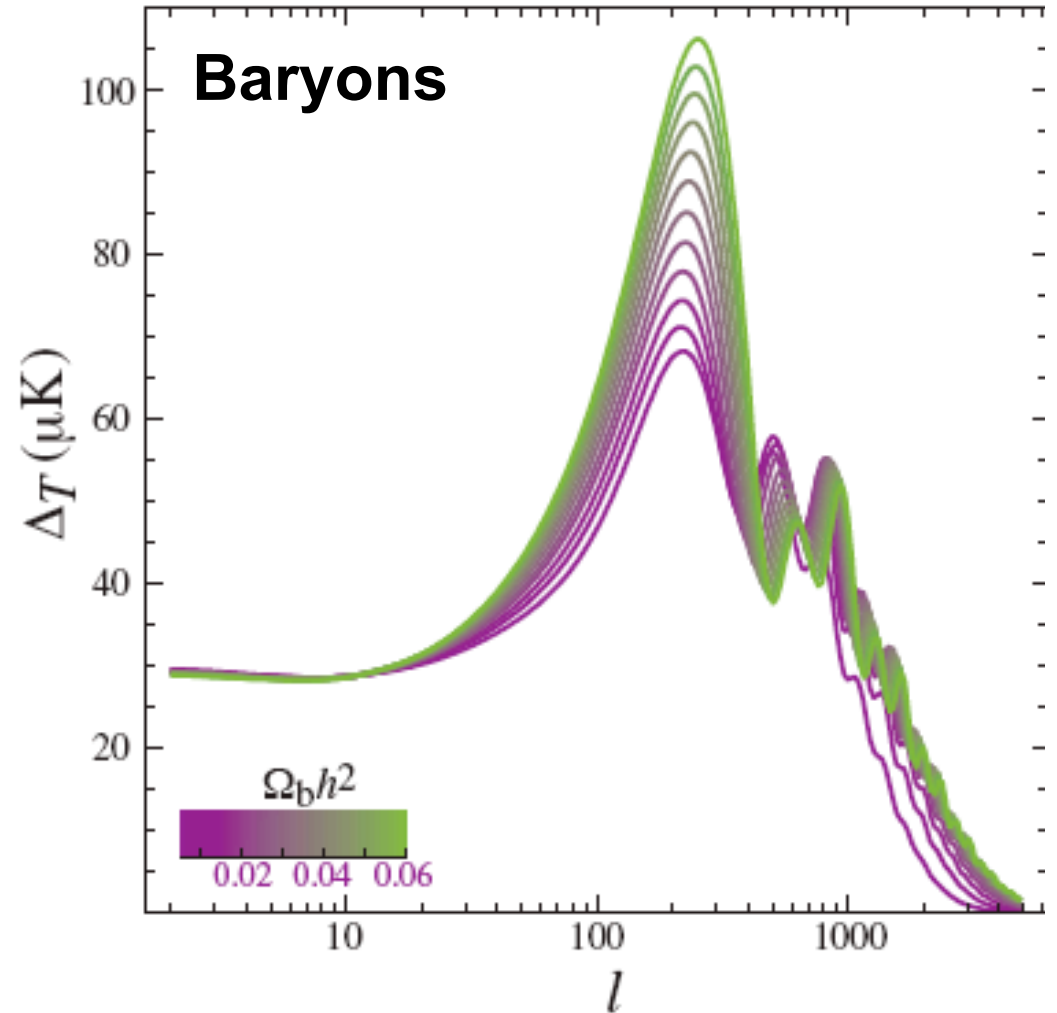
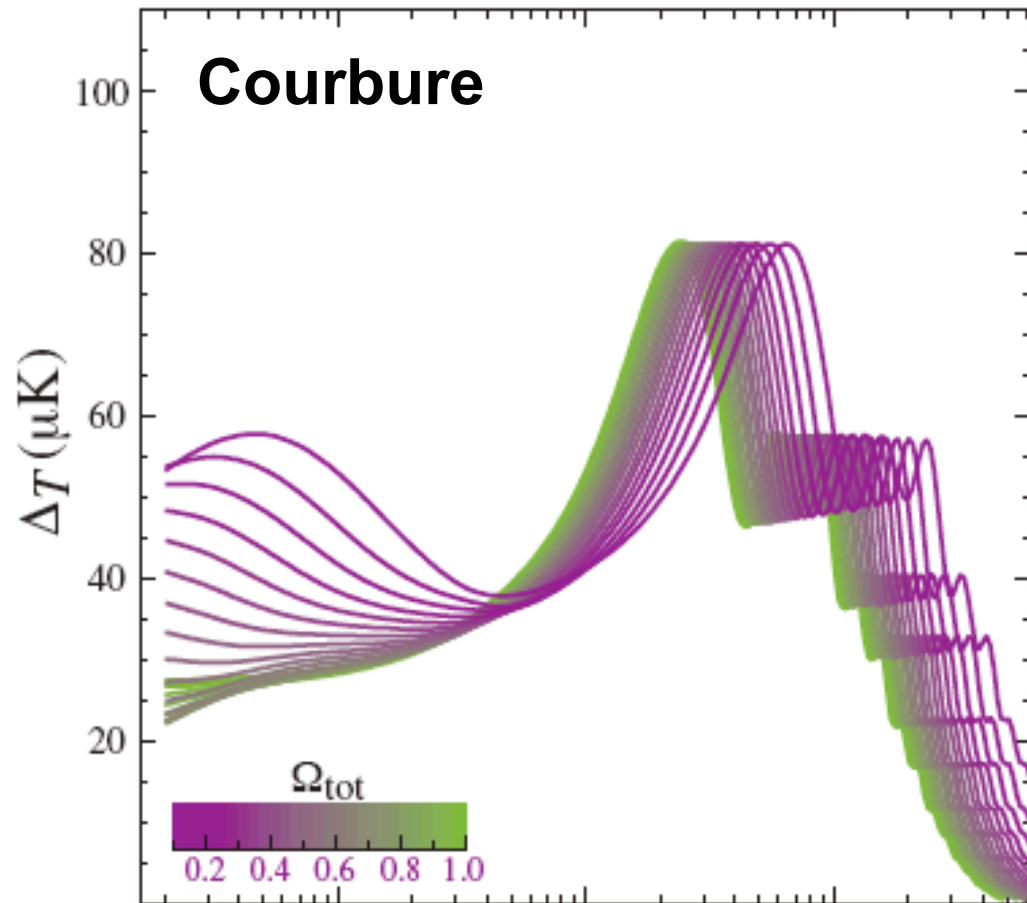


Mécanisme des oscillations

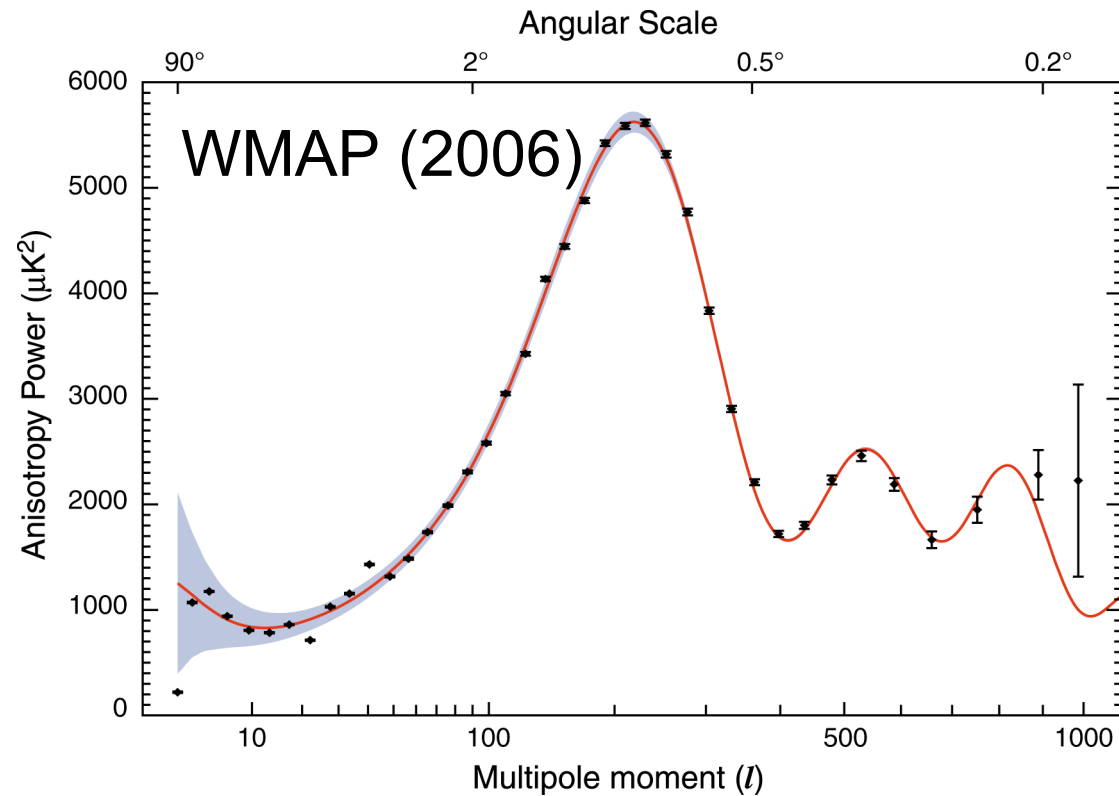
- **Taille fluctuation vs taille de l'horizon**
 - Effondrement à partir de l'égalité matière rayonnement
 - Les petites fluctuations s'effondrent avant les grandes
- Compétition **gravitation** vs **pression de radiation**
 - **Oscillations**
- Spectre de puissance :
 - Amplitude des fluctuations vs échelle angulaire



Dépendance avec les paramètres cosmologiques



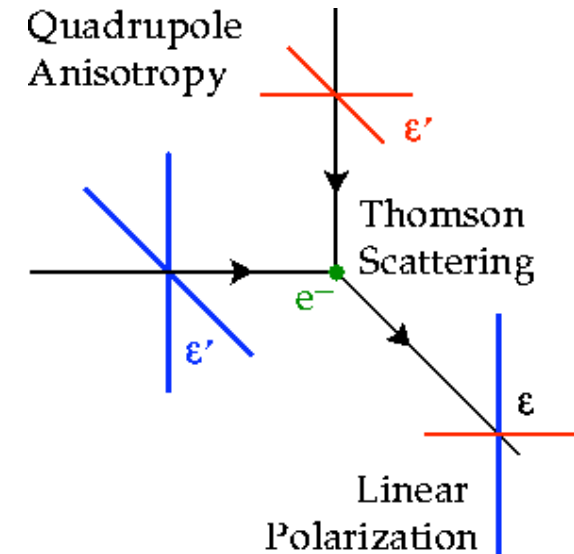
Résultats actuels



Confirme existence de matière noire et d'énergie noire !

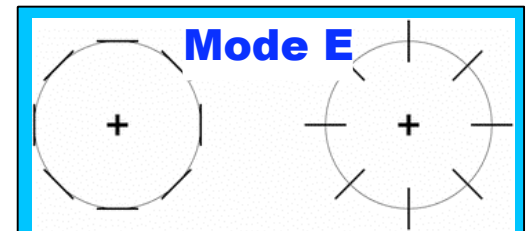
La polarisation

- Au moment du découplage :
 - Diffusion Thomson des photons sur les électrons
 - Présence d'anisotropies : polarisation linéaire

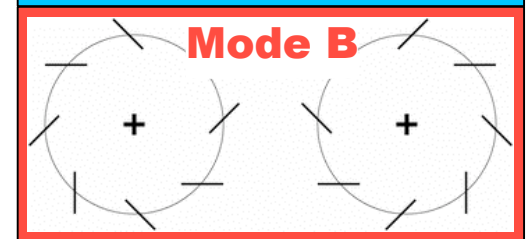


- Décomposition en modes pair et impair ➔ deux nouvelles observables : E et B

origine mode E :
densité + ondes grav.



origine mode B
primordial :
ondes grav. uniquement



Spectres de puissance polarisés

- **Mode E :**

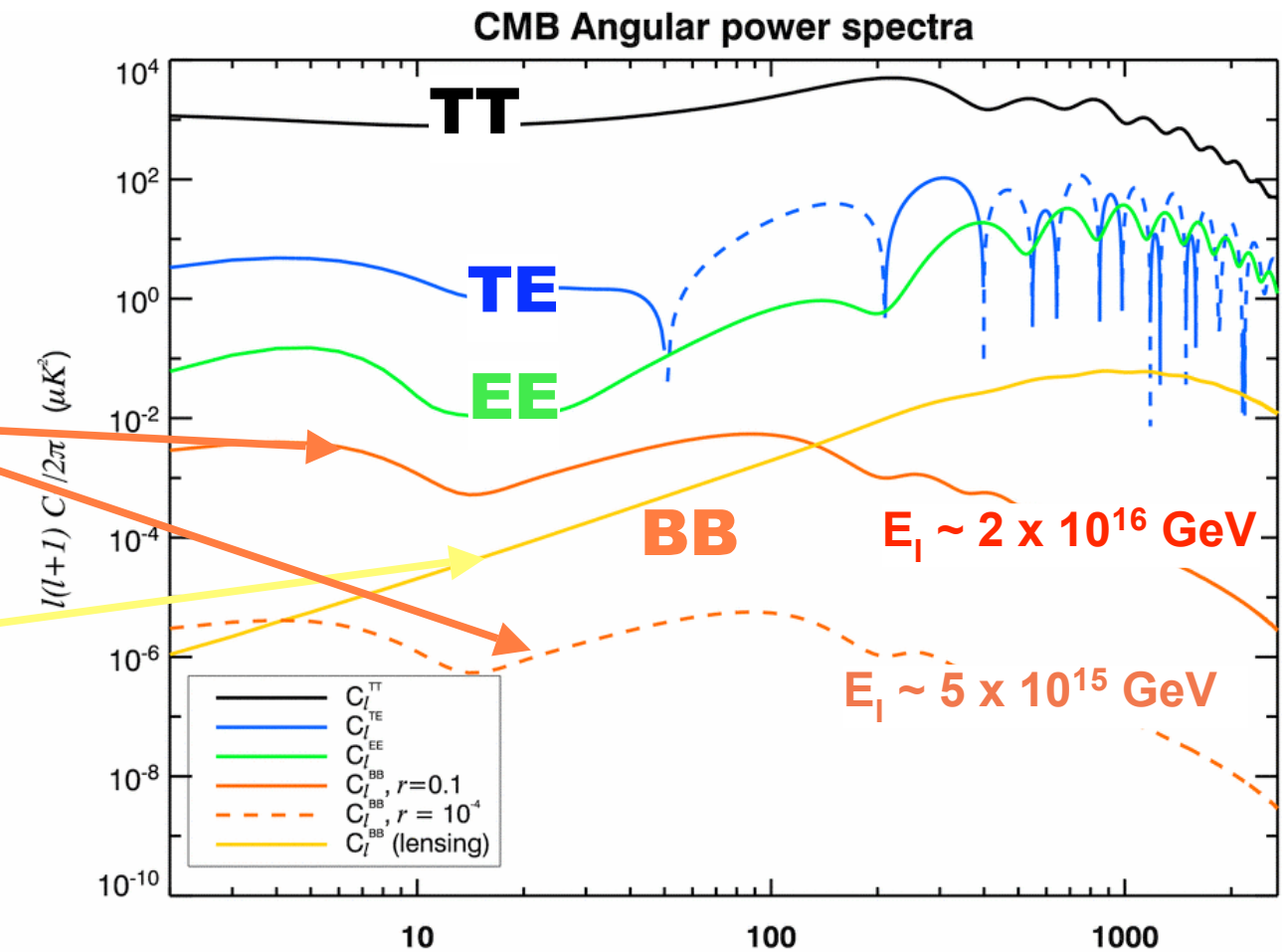
- Mesure des paramètres cosmologiques
- Cohérence du modèle

- **Mode B :**

- **Primordial : échelle d'énergie de l'inflation (ondes gravitationnelles primordiales)**
- **Secondaire : effet de lentille gravitationnelle : sondage des grandes structures**
 - masse des neutrinos
 - énergie noire

- **Défi expérimental**

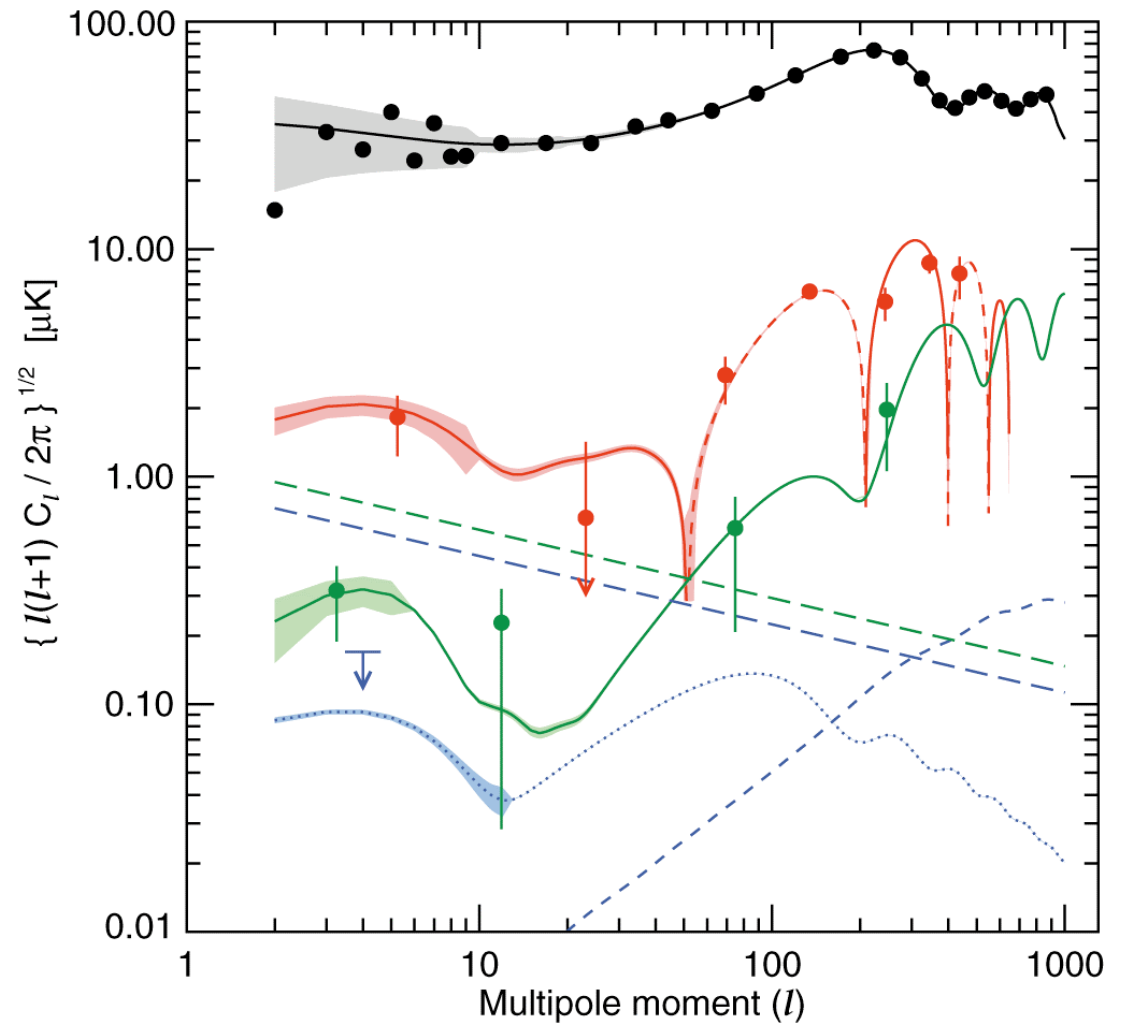
- **B << E << T**



Durée de vie du proton $\rightarrow M_{\text{GUT}} > 10^{15} \text{ GeV}$
inflation \leftrightarrow GUT ?

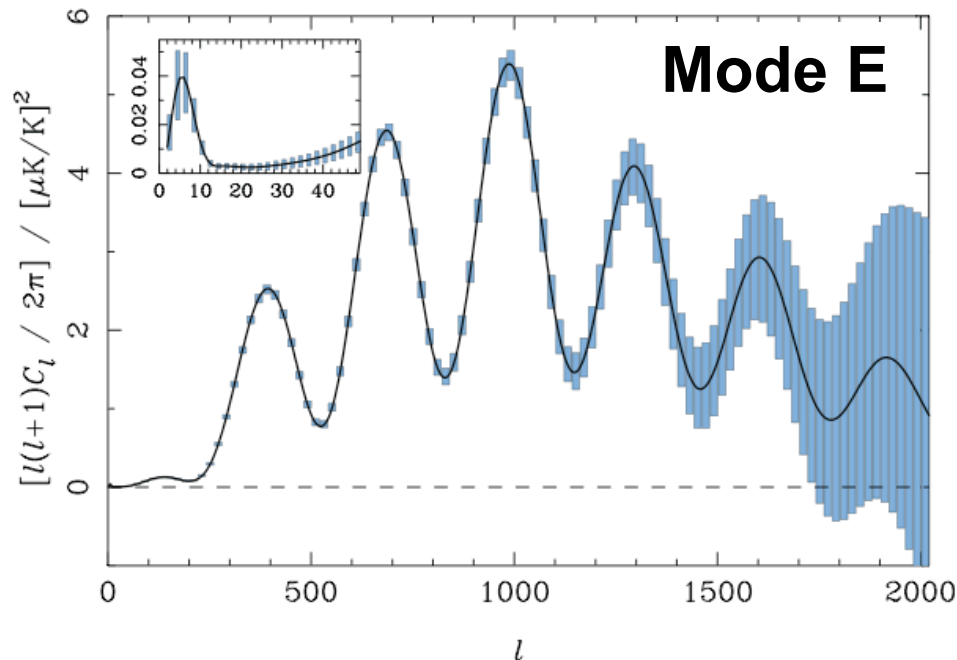
Mesures actuelles

- Première détection du mode E par DASI en 2002
- Corrélation TE et mode E compatible avec prédictions
- Pas de détection du mode B à ce jour...



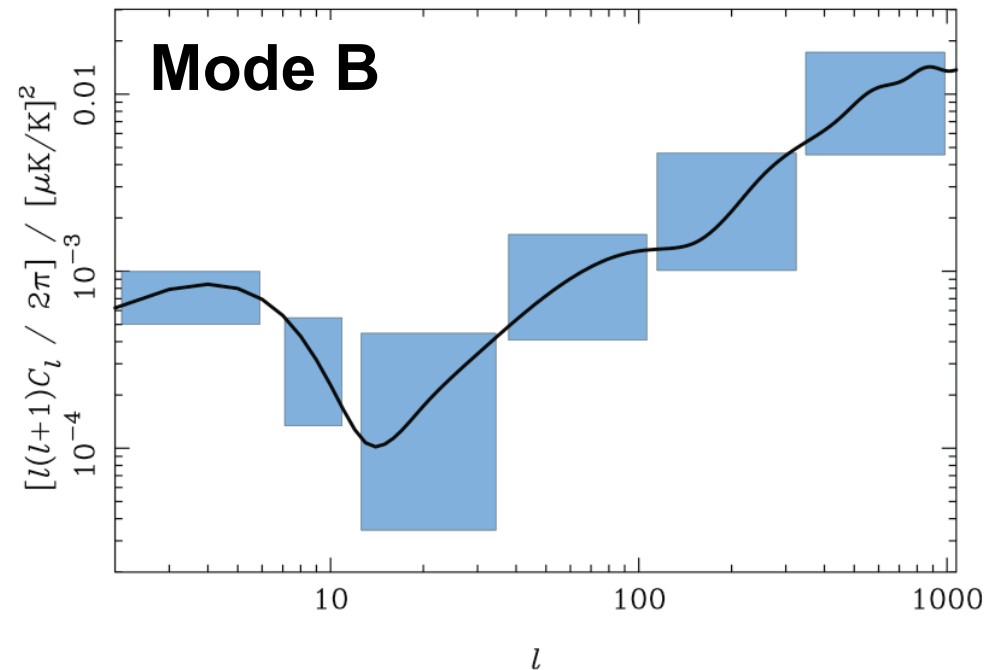
WMAP 2006

Sensibilité de Planck



- Mesure mode E jusqu'à $\ell \sim 1500$
- Détection mode B possible...

- Erreurs statistiques seulement !

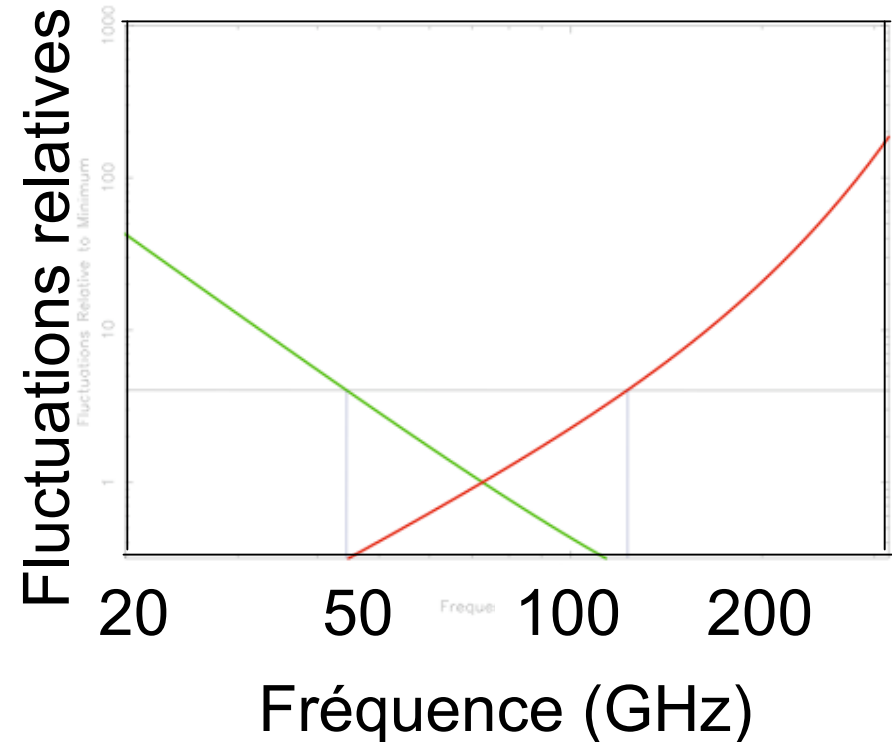


Difficultés : sensibilité, systématiques et avant-plans...

- Avec Planck : sensibilité limitée par le bruit de photon
 - Inutile de faire des détecteurs plus sensibles...
 - Il faut augmenter le nombre de détecteurs : de ~50 (Planck) à qq milliers...
- Contrôle des systématiques :
 - Précision des mesures < micro-Kelvin
 - Polarisation : mesure différentielle ou corrélation
- Problème des avant-plans :
 - Polarisation mal connue aux fréquences du CMB, aux grandes échelles et au niveau de précision requis...

Avant-plans

- Hautes fréquences (>100 GHz) :
poussière galactique
 - Émission polarisée (asymétrie des grains)
 - Mesure à 353 GHz avec Archeops (nuage dans la galaxie)
- Basses fréquences (<100 GHz)
 - Free-free (non polarisé)
 - **Synchrotron** (polarisé)
 - Mesures à très basses fréquences (~ qq GHz) + WMAP
 - « Anomalous dust » ~ 70 GHz (polarisé)

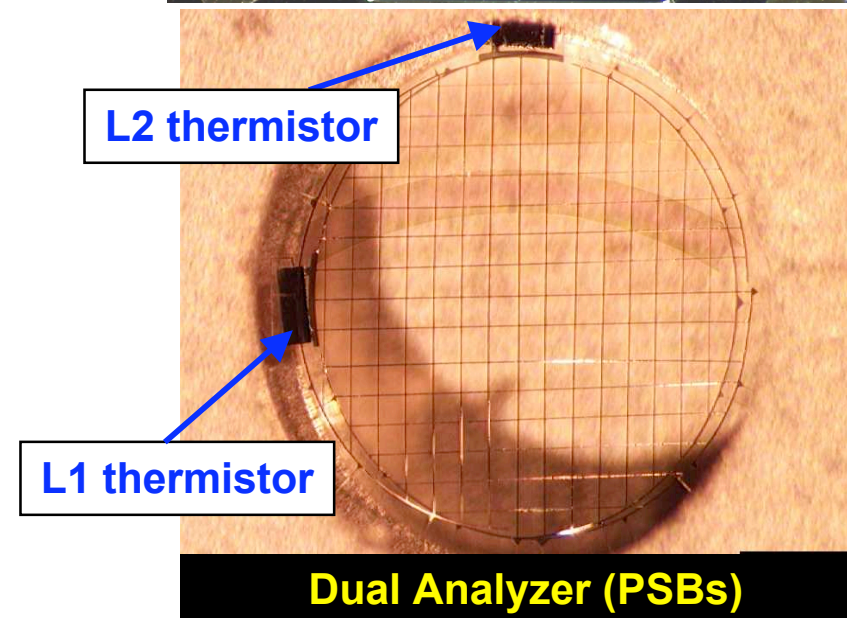
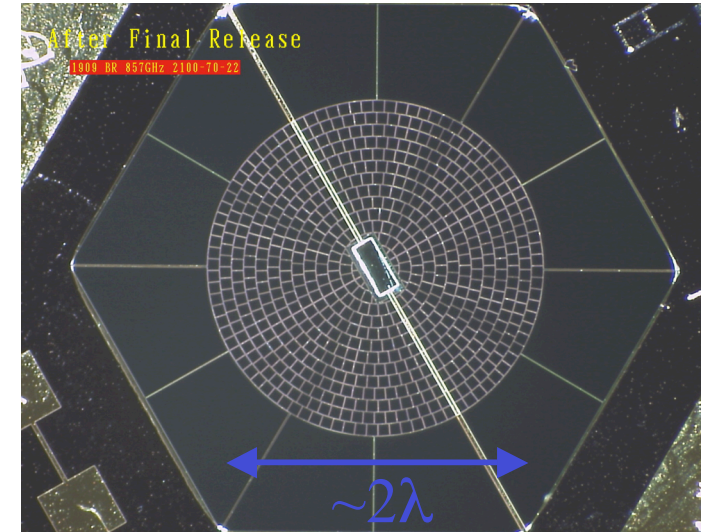
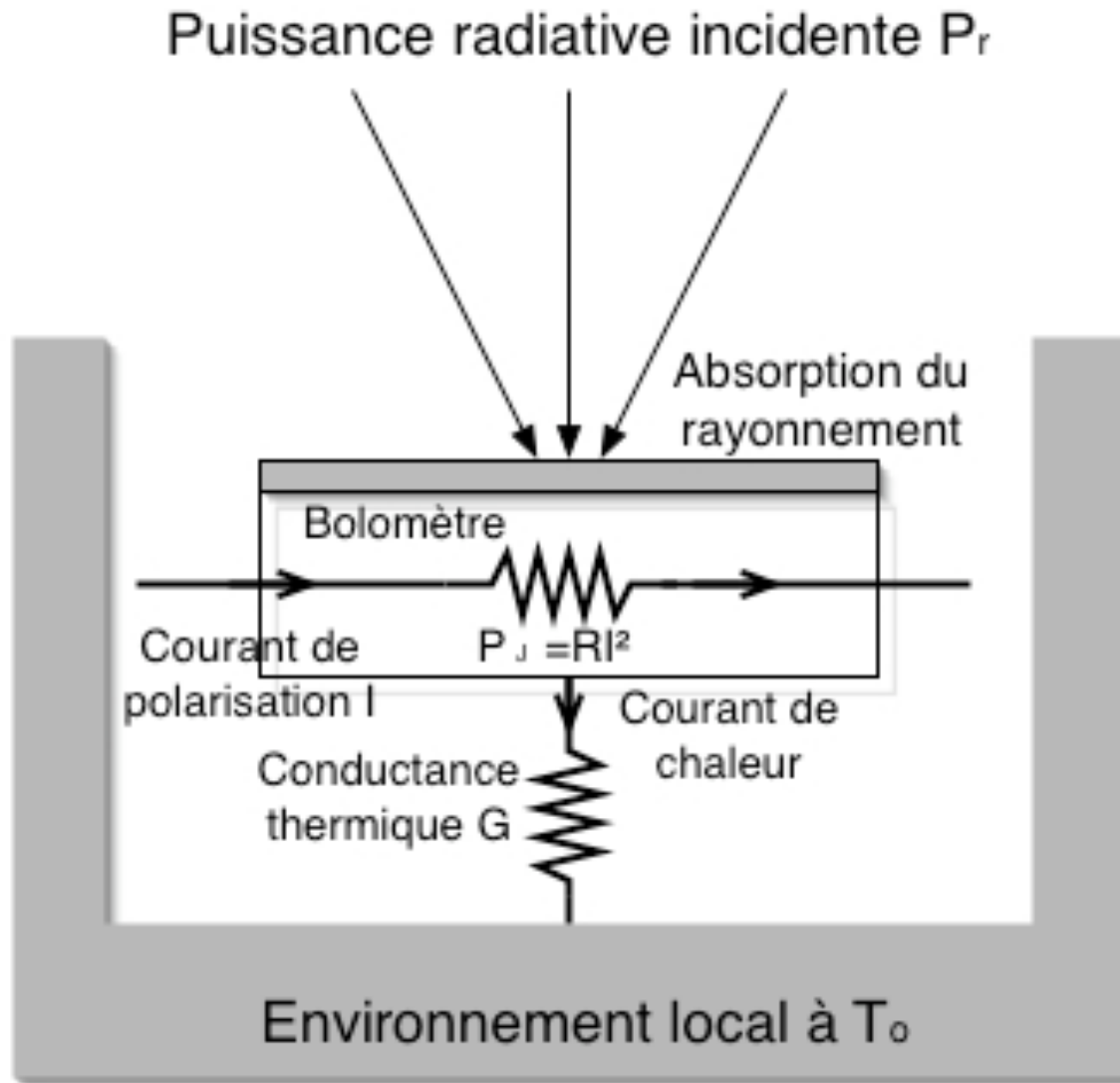


- Nombreuses bandes de fréquences nécessaires, autour du minimum
- Probablement limite ultime...

Détecteurs : bolomètres et radiomètres

- Typiquement :
 - Radiomètres plus simples à mettre en œuvre, bonne sensibilité <90 GHz, détecteurs cohérents
 - Bolomètres plus sensibles aux hautes fréquences (>90 GHz), notamment au-dessus de l'atmosphère (limitation : bruit de photon)
- Dans les deux cas :
 - développement de matrice avec qq milliers de détecteurs nécessaires
 - Nombreux développements technologiques, notamment multiplexage de l'électronique de lecture...
 - Forte concurrence mondiale (US en particulier)

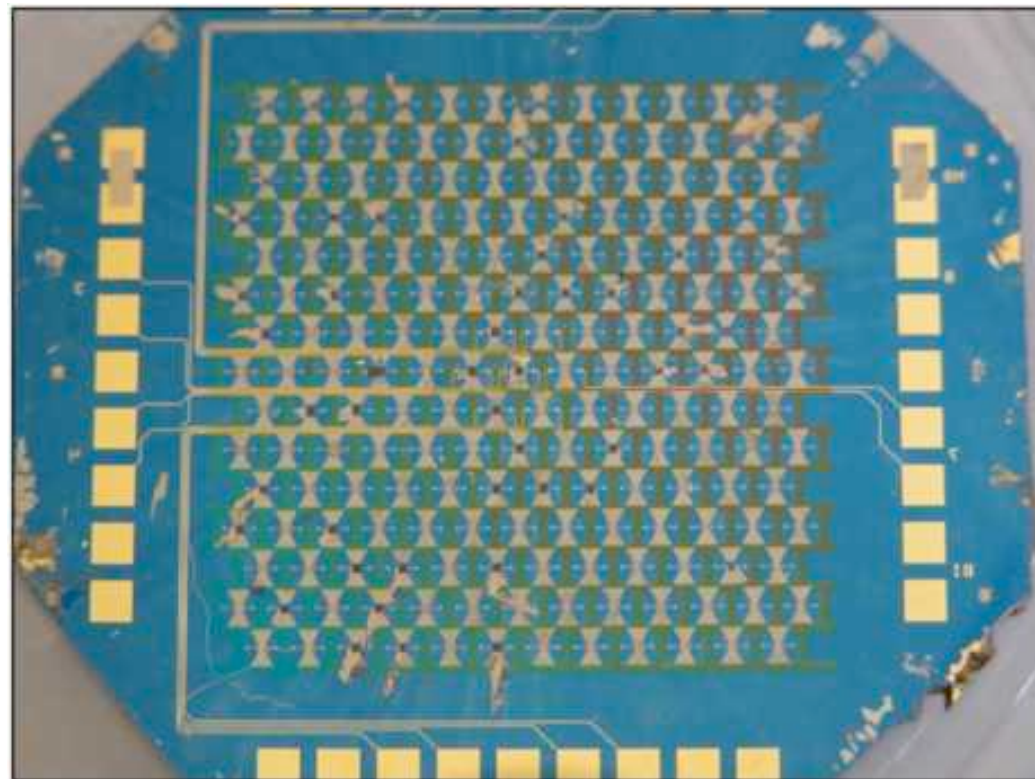
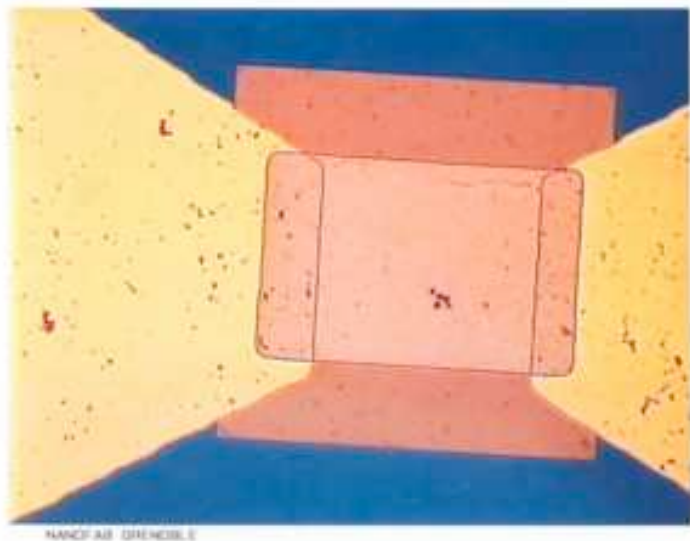
Fonctionnement des bolomètres



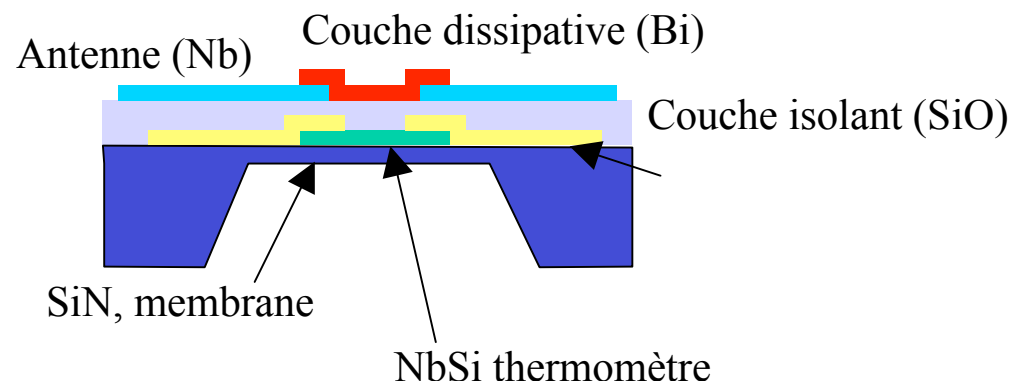
Développements en France

- Importante R&D pour les matrices de bolomètres
- **DCMB** : développement concerté de matrice de bolomètres
 - Accord de coopération de différents laboratoires en France
 - CSNSM, CRTBT, CESR, APC, LPSC, LISIF, IEF, ...
 - R&D soutenue par le programme astroparticule du CNRS, et par le CNES
 - Objectif : ensemble cohérent de moyens et de compétences pour le développement de matrices de bolomètres
 - **Deux filières développées en parallèle** : thermomètres haute impédance ($\sim M\Omega$) ou supraconducteurs ($\sim \Omega$)

Matrice de bolomètre à antenne DCMB



- membranes 1mm (LETI)
- Etape de faisabilité ~OK
- Construction d'une matrice de 187 pixels fonctionnelle en cours...



Quelques expériences en cours/futures

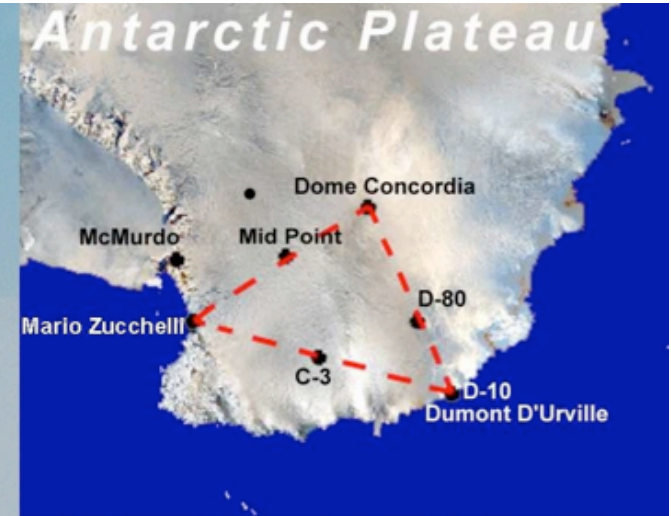
Expériences	BICEP	QUaD	PolarBear	Clover	Brain
Type	Imageur (lentille)	Imageur (télescope symétrique)	Imageur (télescope asymétrique)	Imageur (télescope)	Interféromètre bolométrique
Détecteurs	96 PSB Rotateur Faraday	31 PSB Lame demi- onde	Antennes + matrice de bolomètres (300	Matrices de bolomètres (4x 8x8)	Matrice de bolomètres (256)
Objectif	Mod Mode B gravitati	+ une dizaine d'autres !! (dont 2 ballons et un interféromètre bolométrique)			
Date	2005- installée	installée	2007	2008-2010	en 2006
Site	Pôle Sud	Pôle Sud	White Mountain (CA)	Antarctique Dôme C ou Chili	Antarctique Dôme C

BRAIN



BRAIN : Site Dôme C

Lat: 75° 06' S Lon: 123° 23' E
Altitude 3230m osl
Main air temperature -50.8 °C
Typical monthly average air temperature in summer -30 °C
Typical monthly average air temperature in winter -60 °C
Mean wind speed 2.8 m/s 5.4 knots
Mean air pressure 645 hPa
Yearly precipitation range (snow) 2-10 cm



BRAIN site

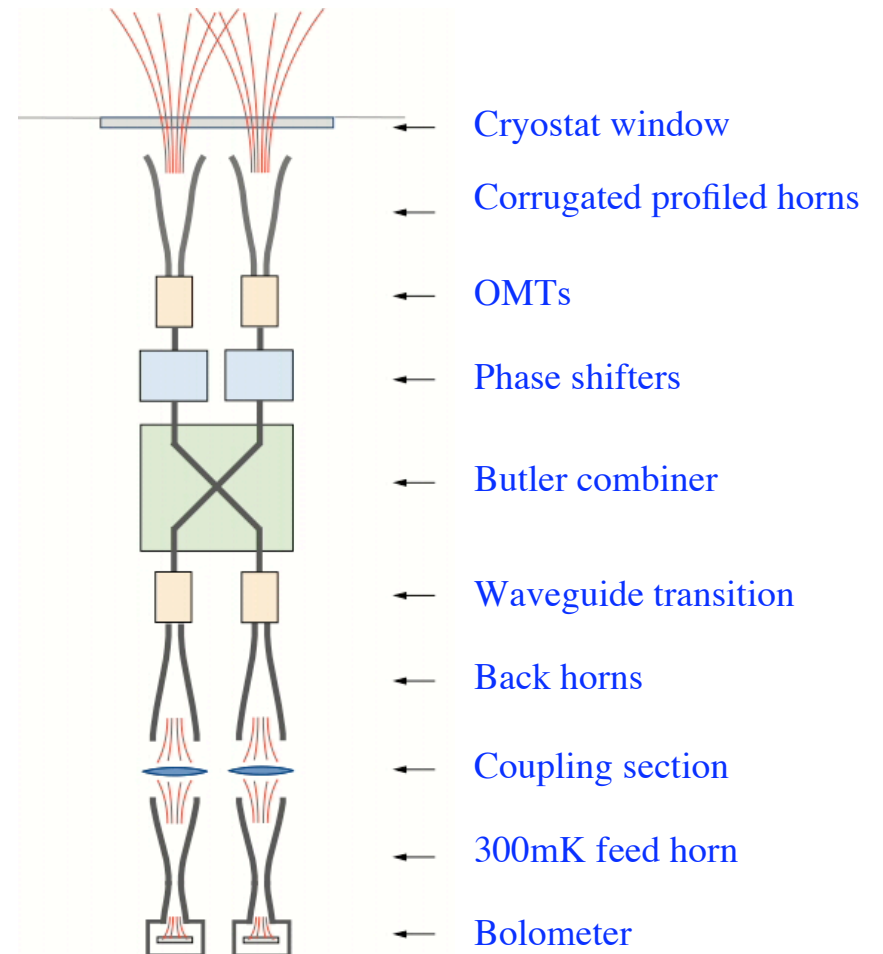
Is Dome-C the best site for B-modes measurements?

Le projet BRAIN

- **Imageur** : la polarisation est mesurée par différence de signaux, très sensible aux systématiques
- **Interféromètre** : mesure directe des paramètres de Stokes (corrélation)
- Idée : associer **sensibilité des bolomètres** et maîtrise des systématiques de l'**interférométrie**
 - Pas de télescope
 - Mesure directe de la transformée de Fourier du ciel : accès direct aux modes E et B
 - Excellente sensibilité des bolomètres
 - Interféromètre : limitation des perturbations de l'atmosphère

Le projet BRAIN

- **Objectif de BRAIN :**
détection du mode B des ondes gravitationnelles primordiales (**inflation**)
- Collaboration
Italie/France/Royaume-Uni
- **Calendrier :**
 - Test du site au Dôme C (antarctique) hiver 2005–2006
 - Ligne de base en 2007
 - Instrument complet en 2010 (256 bolomètres, 20000 lignes de base)



Conclusion

- Proposition au CNES d'un mini-satellite dédié à la mesure de la polarisation
 - Rejeté car trop ambitieux...
- Appel d'offre de l'ESA pour un satellite européen dédié
 - Horizon 2015-2020
- Projets similaires aux Etats-Unis, avec calendrier similaire

- Mais :
 - Technologies pas encore prêtes...
 - Peu d'information sur les avant-plans
 - Données de Planck (polarisation dans 7 bandes de fréquences, tout le ciel) très importantes !

- **Nécessité de faire des expériences au sol ou en ballon avant !**

Électronique de lecture basse impédance

- Utilisation de NbSi supraconducteur
- Lecture à SQUID : placé au plus près du bolomètre
- Réalisation d'un amplificateur à 4K pour SQUID à base de transistor SiGe
 - Collaboration APC/LISIF
 - Caractérisation en cours

