

Evolution de l'instrumentation pour l'observation du CMB: de Penzias et Wilson à la mesure des anisotropies polarisées

Michel Piat

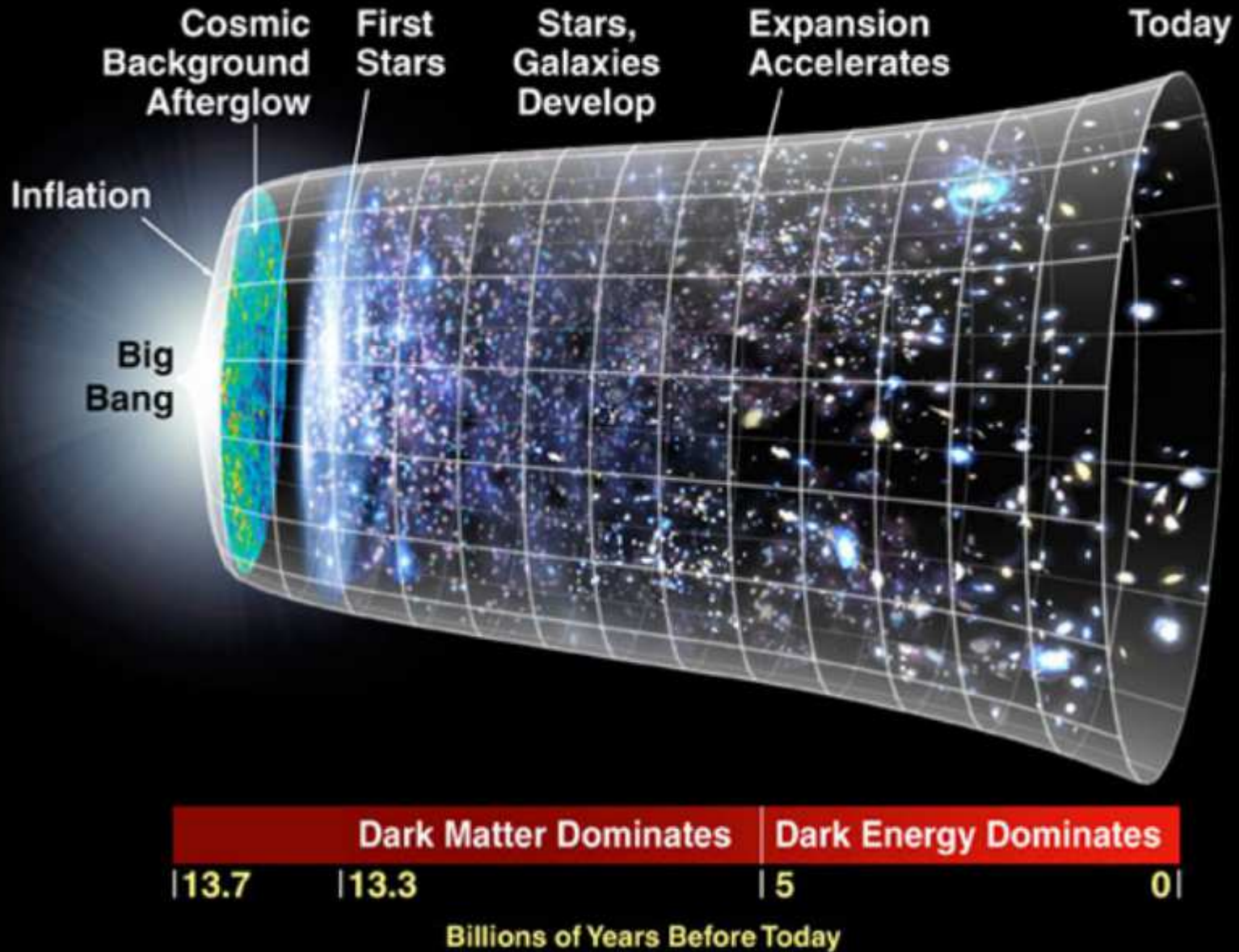
Laboratoire Astroparticule et Cosmologie
Université Paris Diderot

université
PARIS
DIDEROT
PARIS 7



SAF – 15 mars 2014

THE EXPANDING UNIVERSE: A CAPSULE HISTORY

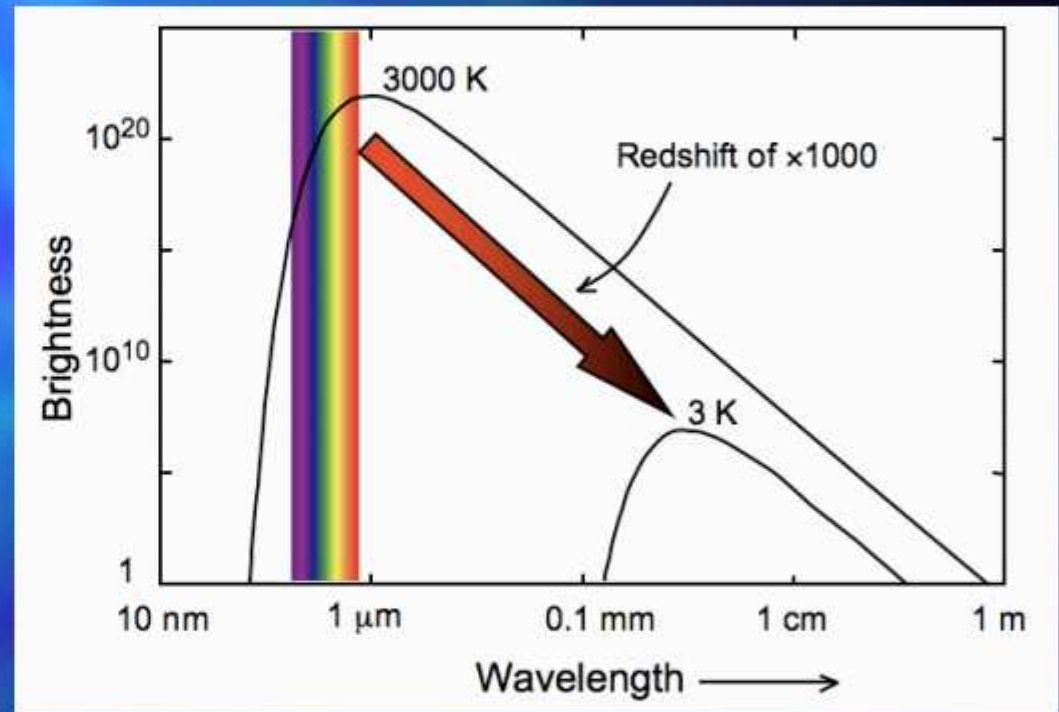


Sommaire

1. Instrumentation pour la mesure du CMB
2. Historique des observations du CMB
3. Vers la mesure précise de la polarisation du CMB

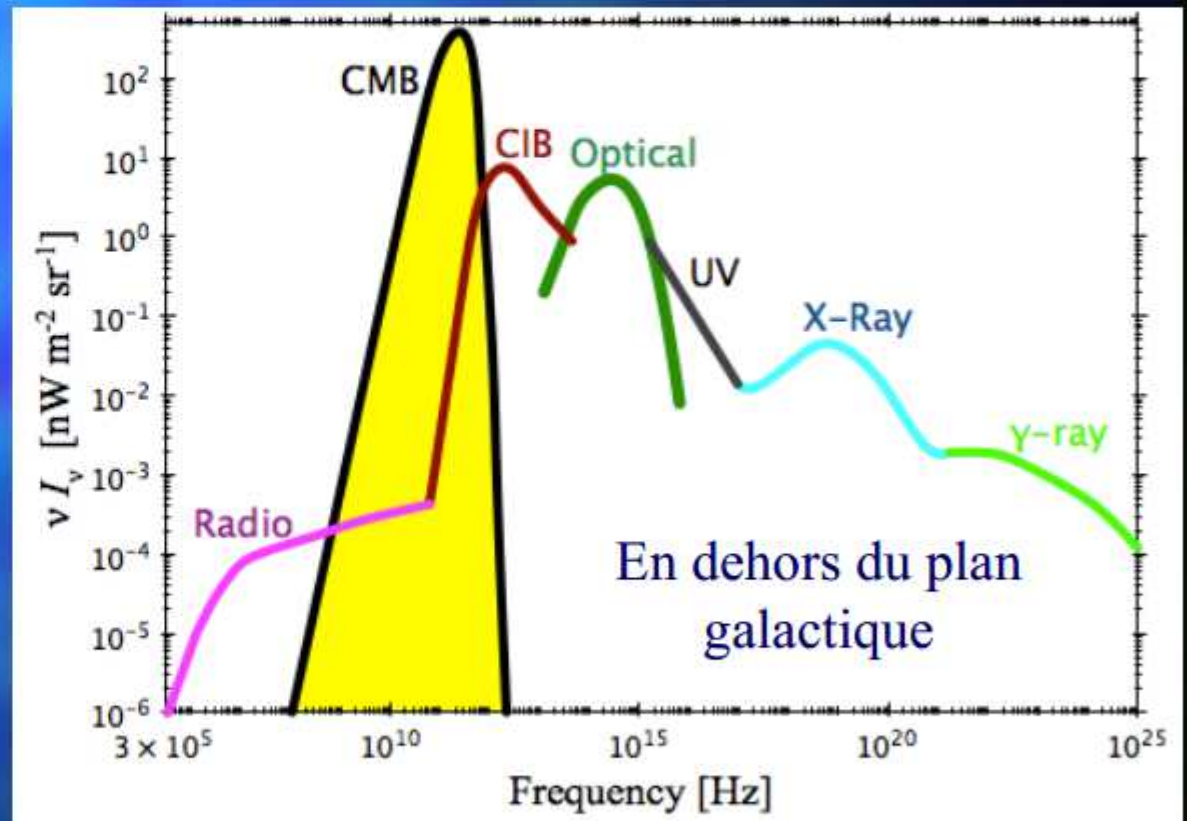
1. Comment mesurer le rayonnement fossile?

- Rayonnement fossile: spectre d'un corps noir à 3K soit -270°C !
 - 3000K avec $z \approx 1100$
- Domaine de longueur d'onde:
 - Max autour de 2mm
- Photométrie:
 - Pas de caractéristiques spectrales
 - Puissance des photons dans une bande spectrale large



Et les avant-plans?

- CMB dominant entre $\sim 1\text{GHz}$ et $\sim 500\text{GHz}$
- Energie des photons de $\sim 4\mu\text{eV}$ à $\sim 2\text{meV}$
- 2 technologies de détection possibles:
 - Détection radio
 - Détection thermique



Méthode radio: détection hétérodyne

- Electronique haute fréquence: antenne

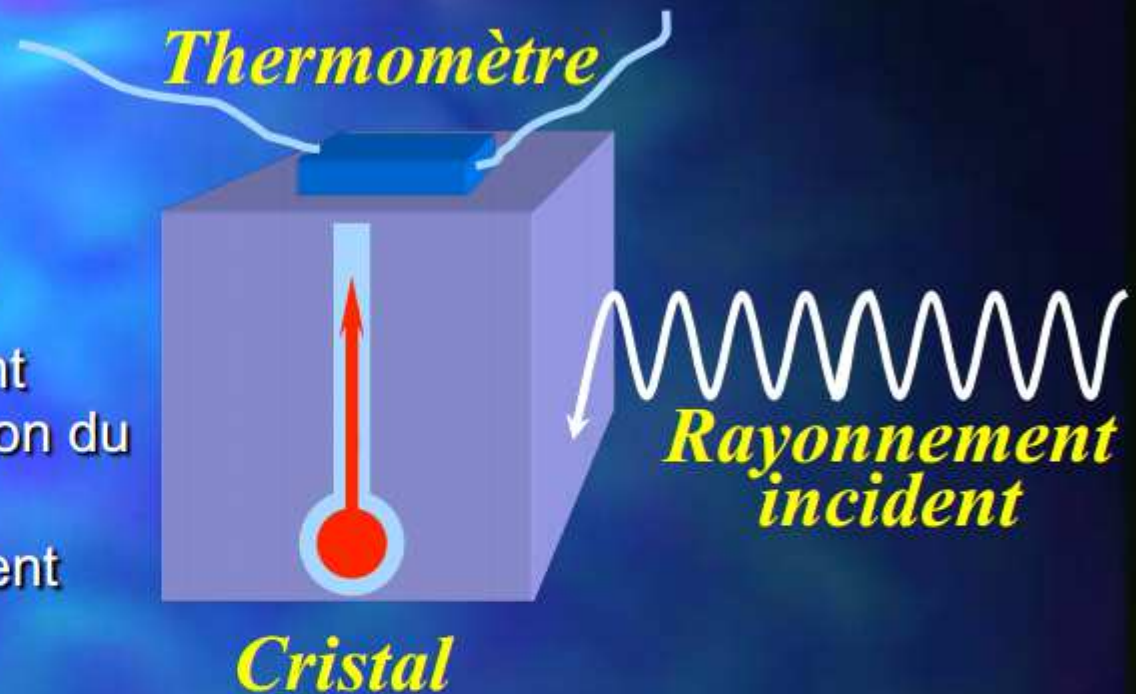


- Sensibilité intéressante

- Refroidi à 4K (-269°C)
- Fréquences < 100GHz
- Intrinsèquement limité en sensibilité

Détection thermique: Bolomètre

- Détecteur thermique
 - Mesure l'échauffement résultant de l'absorption du rayonnement
 - Thermomètre = élément résistif
- Sensibilité: $T < 0.3\text{K}$
 - Peut mesurer 10^{-17} W en 1s !
 - **Instrumentation lourde...**
- Meilleurs détecteur large bande dans la gamme $100\mu\text{m}-3\text{mm}$



Bolomètres à très basse température ($T < 0.3\text{K}$):
Sensibilité limitée par le bruit de photon et non par le détecteur!

Spiderweb bolometers (Caltech-JPL)



■ Bolomètre « Spiderweb » (Caltech-JPL)

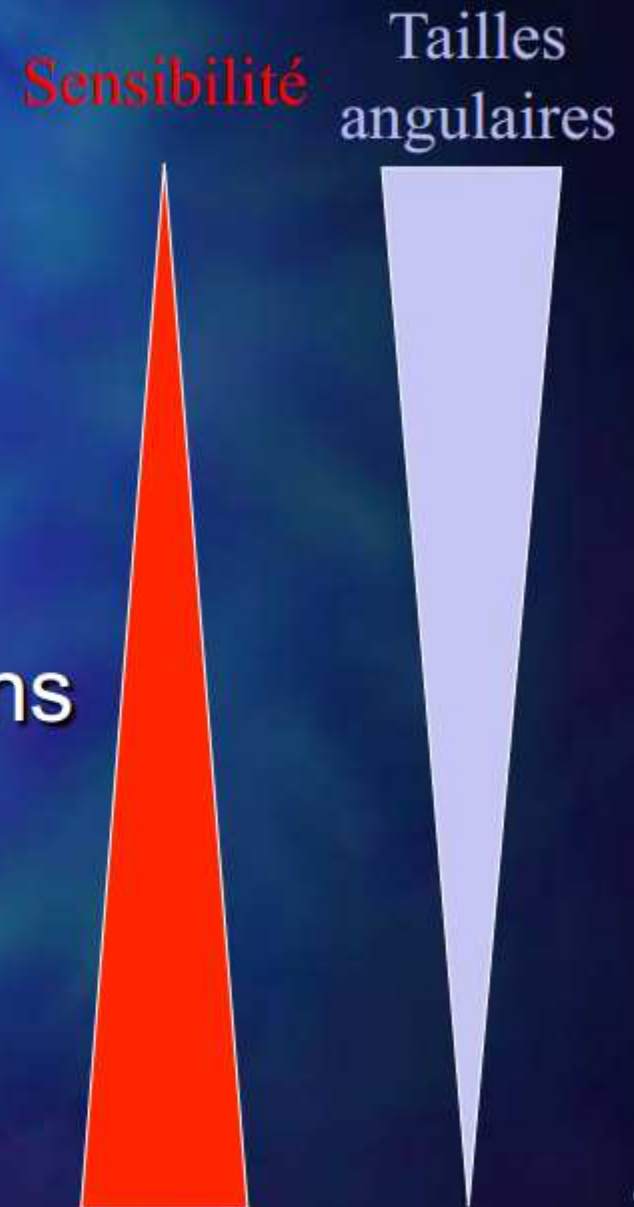
- Absorbeur en toile d'araignée (Si_3N_4)
 - $e \sim 1\mu\text{m}$, $l \sim 5\mu\text{m}$,
maille $\sim 100\mu\text{m}$
 - Métalisation Au
- Thermomètre Ge NTD



Détecteurs Planck-HFI

2. Historique des mesures du rayonnement fossile

- 1964-65: Penzias et Wilson
 - La découverte
- 1989: Satellite COBE
 - Spectre de corps noir, fluctuations
- 1997-2002: expériences ballons
 - Premier pic dans le spectre de puissance
- 2001: WMAP
- 2009: Planck
- ...

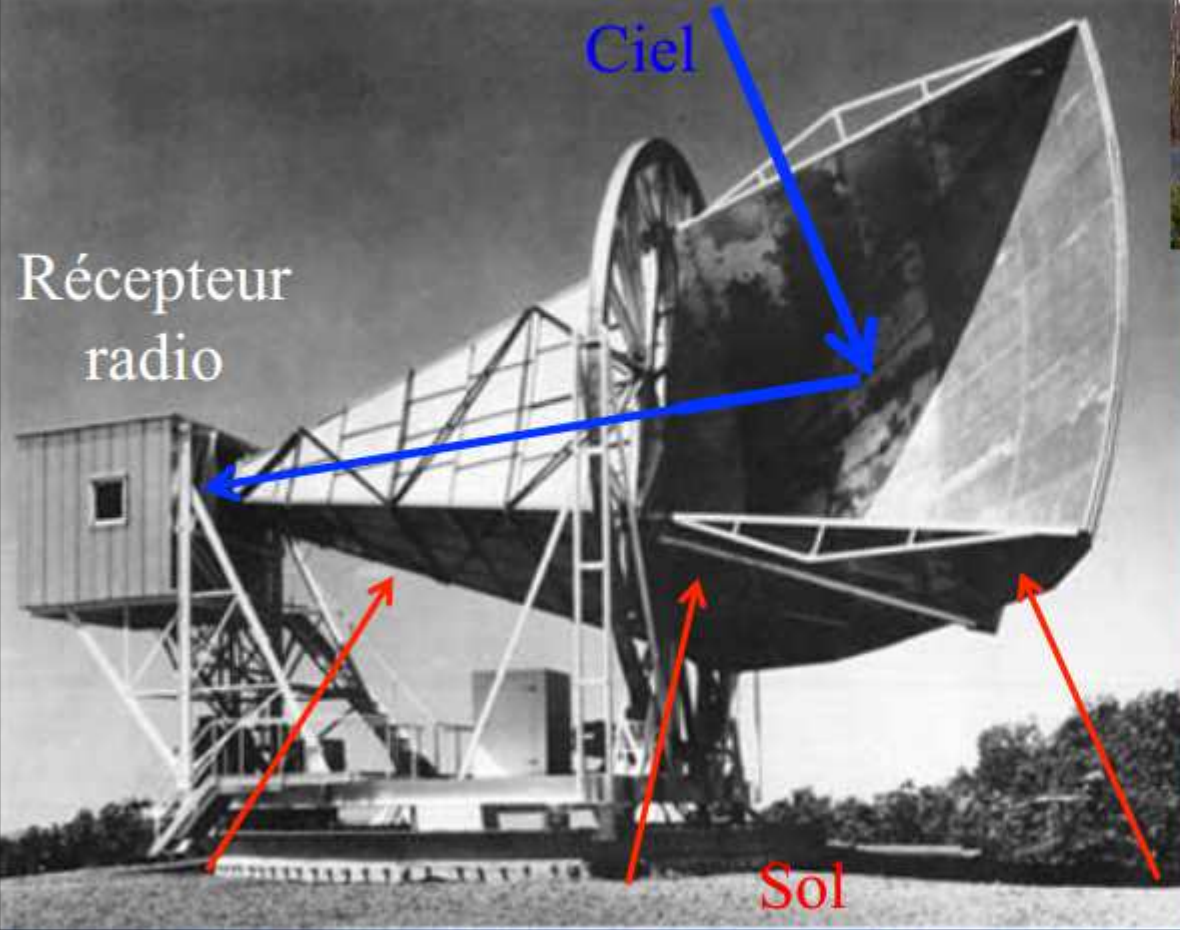


1964...



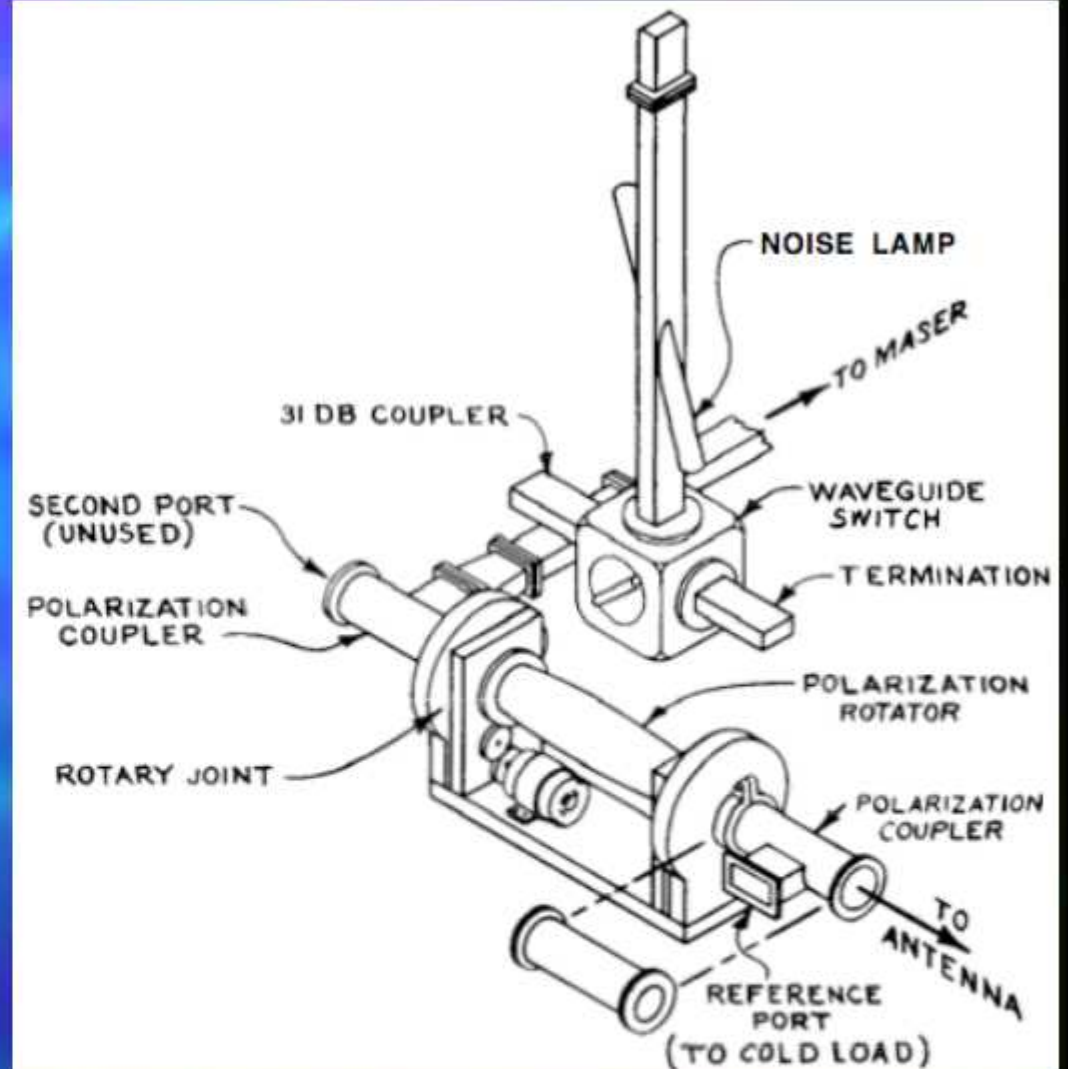
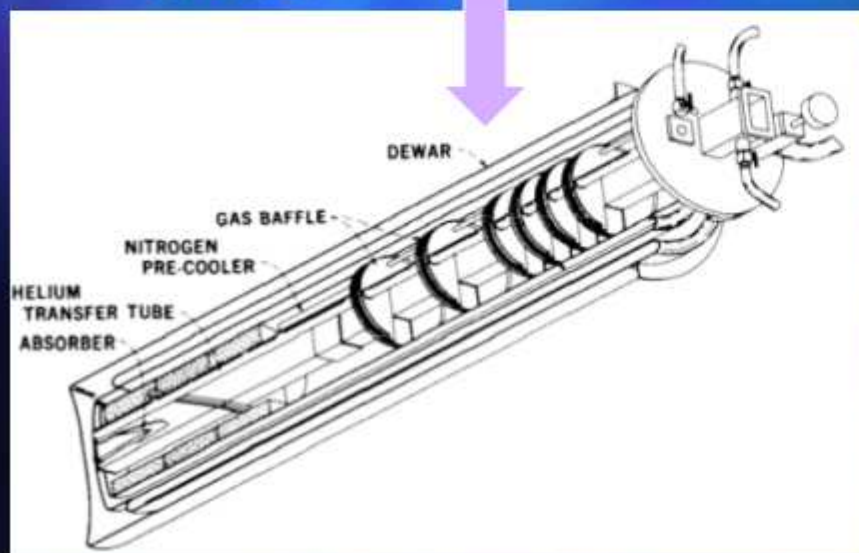
- Penzias et Wilson: radioastronomes
 - Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
 - Etude de l'émission radio de la voie lactée à 7cm puis 21cm de longueur d'onde
- Antenne de 6.1m de diamètre
 - Utilisée précédemment pour la communication avec des satellites

L'antenne (ou télescope)



Le récepteur radio

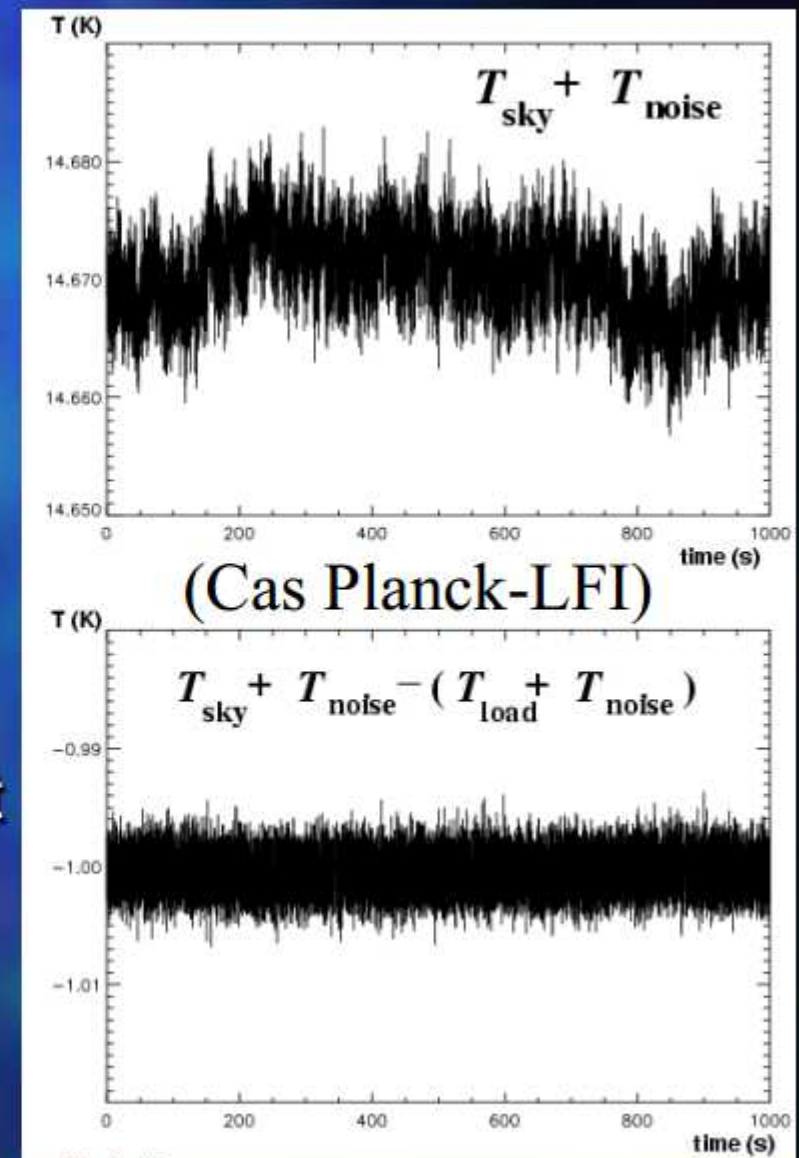
- Sensibilité: $\sim 0.2\text{K}$
- Amélioration: utilisation d'une source de référence à 4K



Effet de la source froide

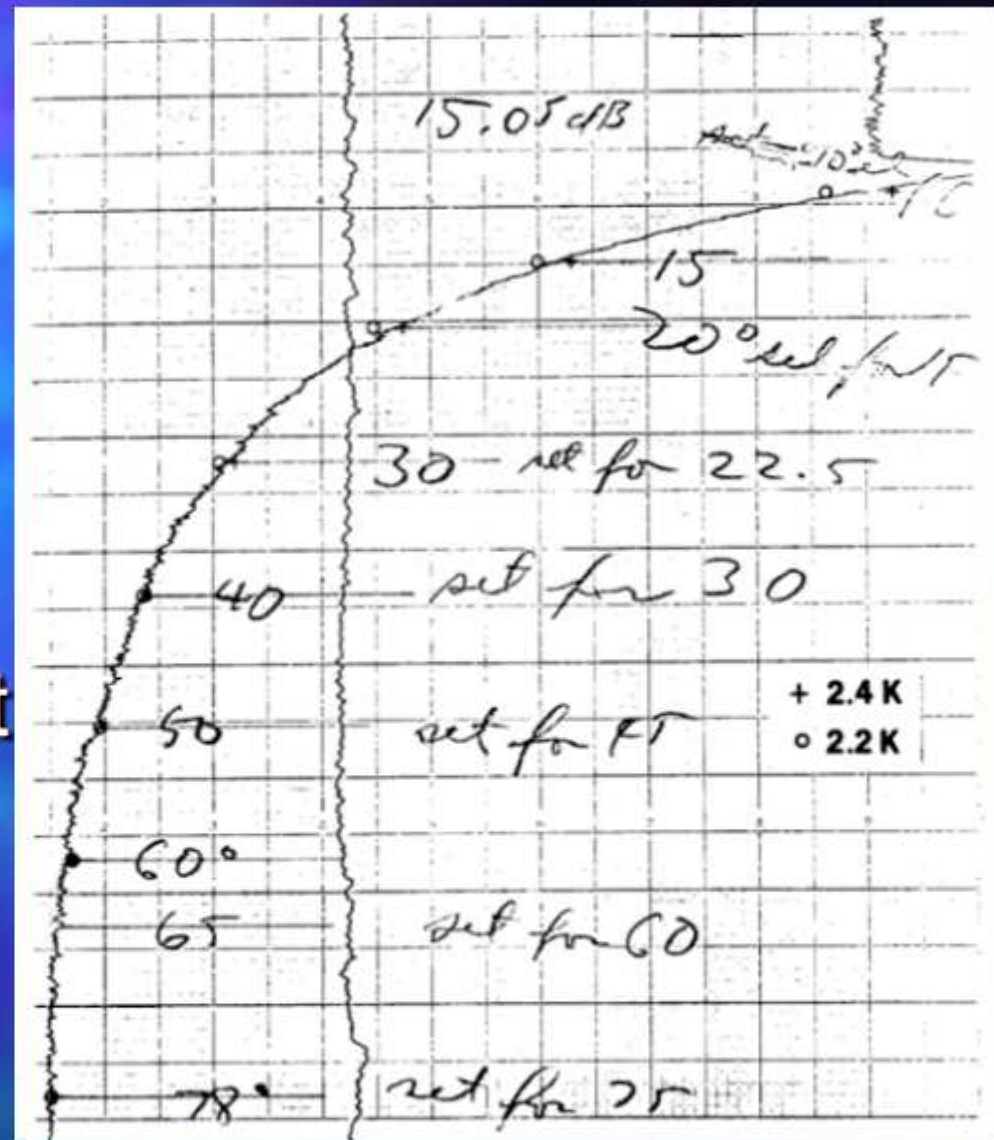
- Sans source de référence:
 - Fluctuations de gain de l'amplificateur
- Avec source de référence:
 - Recherche de zéro
 - Les fluctuations de gain n'ont plus d'effet!

➔ **Mesure plus précise!**



Caractérisation de l'atmosphère

L'émission atmosphérique radio se modélise facilement
Atmosphère = 2.3K



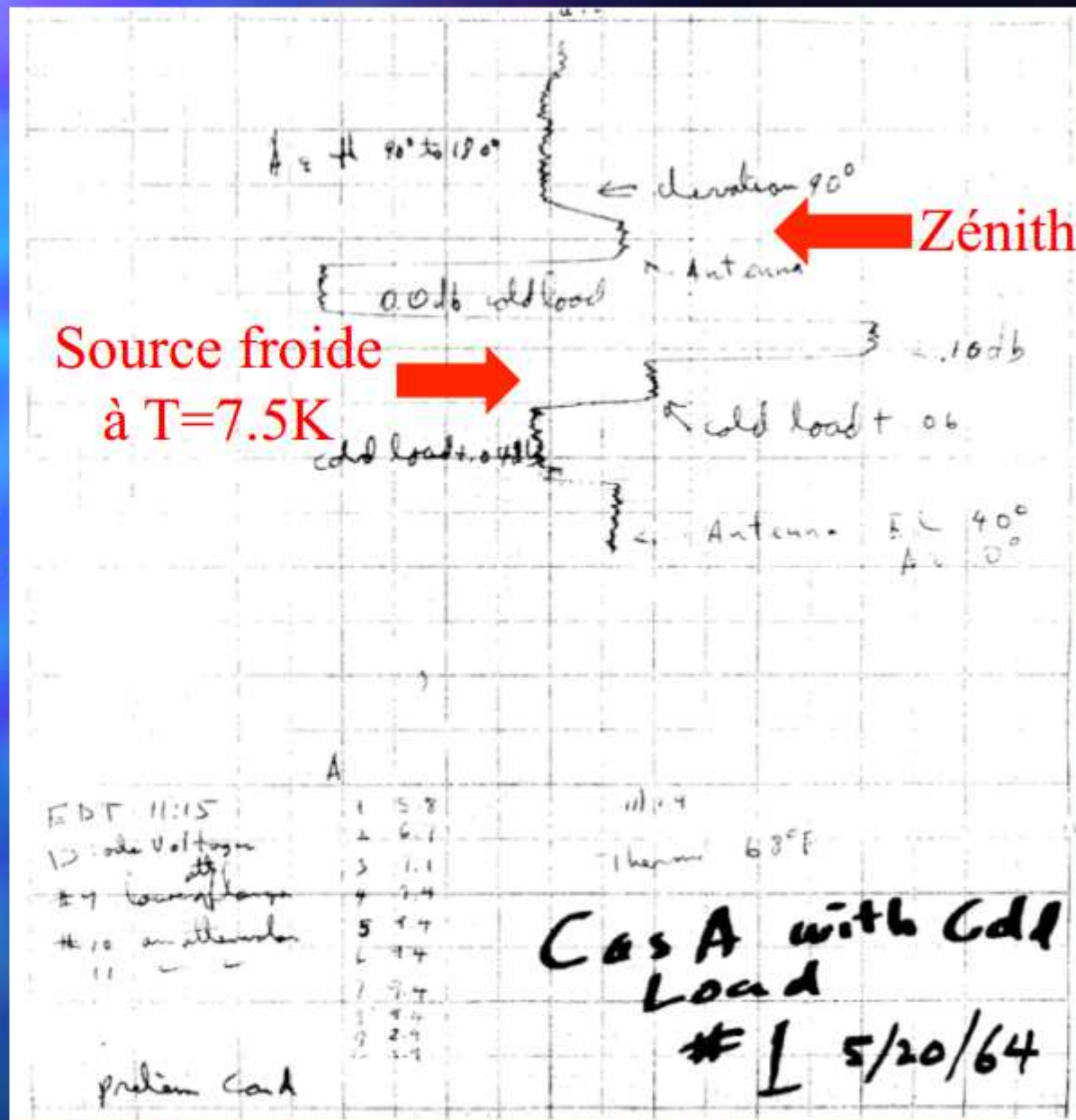
La 1^{ère} détection

Zénith = 7.5K

Atmosphère = 2.3K

Télescope = 1K

Il manque ~4K ???



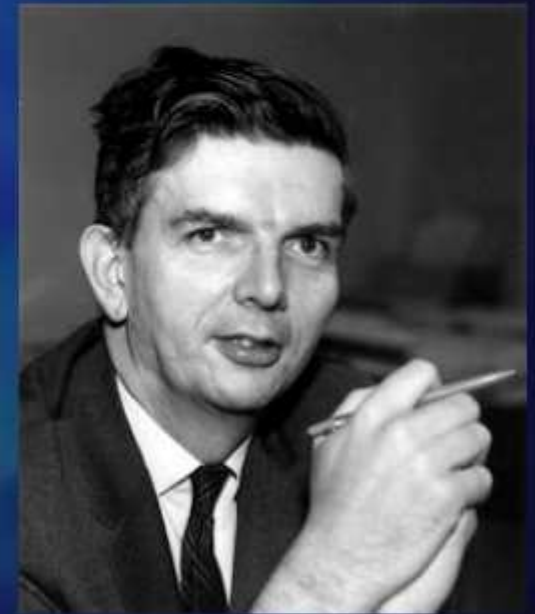
Origine de cet excès?



- Atmosphère? Non...
- Activité humaine? New York n'émet pas plus...
- Emission de l'instrument? Même le nettoyage de l'antenne (pigeons) ne change rien...
- Notre Galaxie ou sources radio?
L'émission semble uniforme sur le ciel...

C'est le rayonnement fossile!

- Discussion de cette mesure avec un radioastronome qui avait connaissance de cette possibilité
- Dicke était en train de monter une expérience dédiée...
 - « *Well boys, we have been scooped* »



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5°K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and

(ApJ 142, p419, 1965)



The Nobel Prize in Physics 1978

"for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics"

"for their discovery of cosmic microwave background radiation"



Pyotr Leonidovich Kapitsa

🕒 1/2 of the prize

USSR

Academy of Sciences
Moscow, USSR

b. 1894
d. 1984



Arno Allan Penzias

🕒 1/4 of the prize

USA

Bell Laboratories
Holmdel, NJ, USA

b. 1933
(in Munich, Germany)



Robert Woodrow Wilson

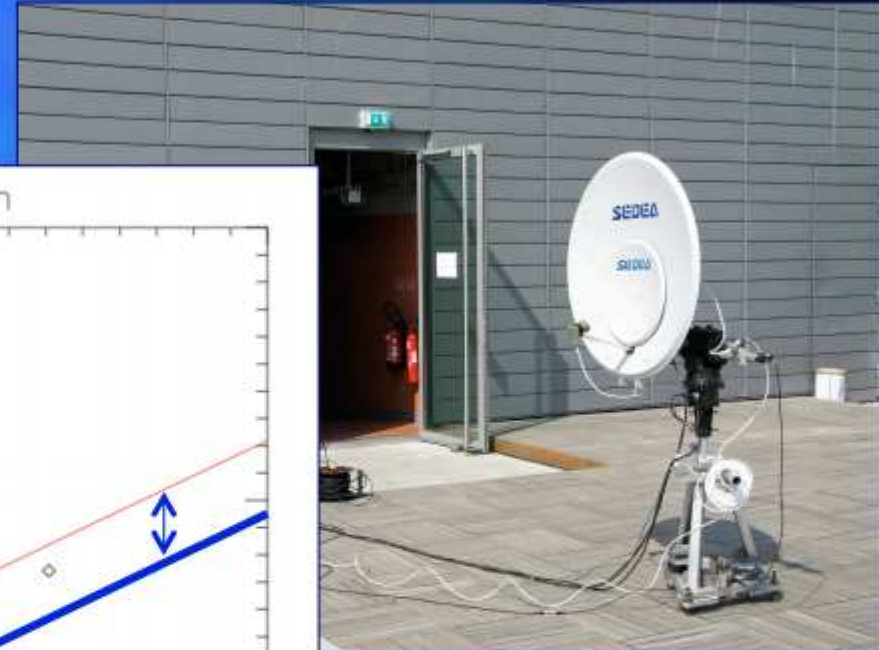
🕒 1/4 of the prize

USA

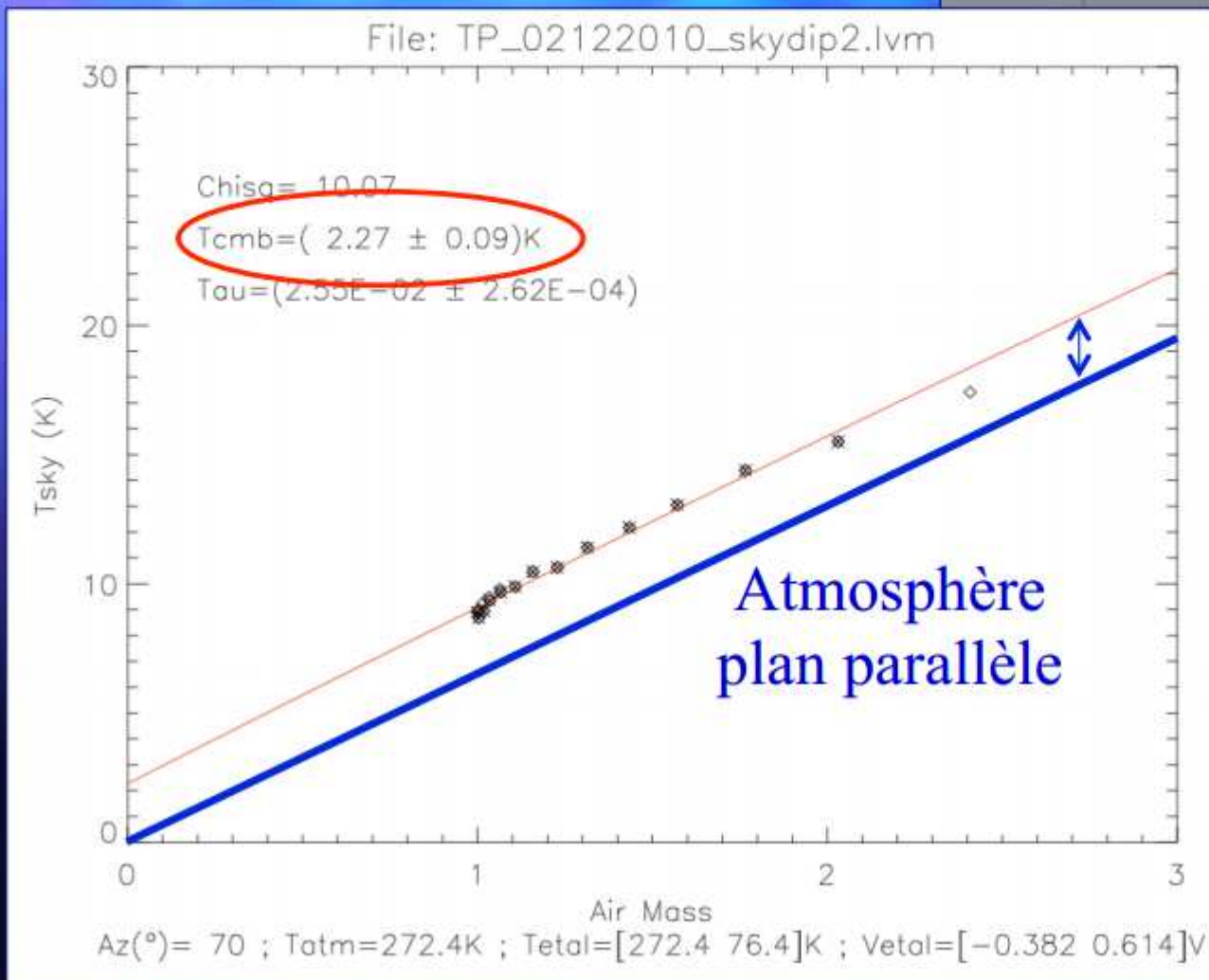
Bell Laboratories
Holmdel, NJ, USA

b. 1936

Détecter le CMB depuis son jardin...

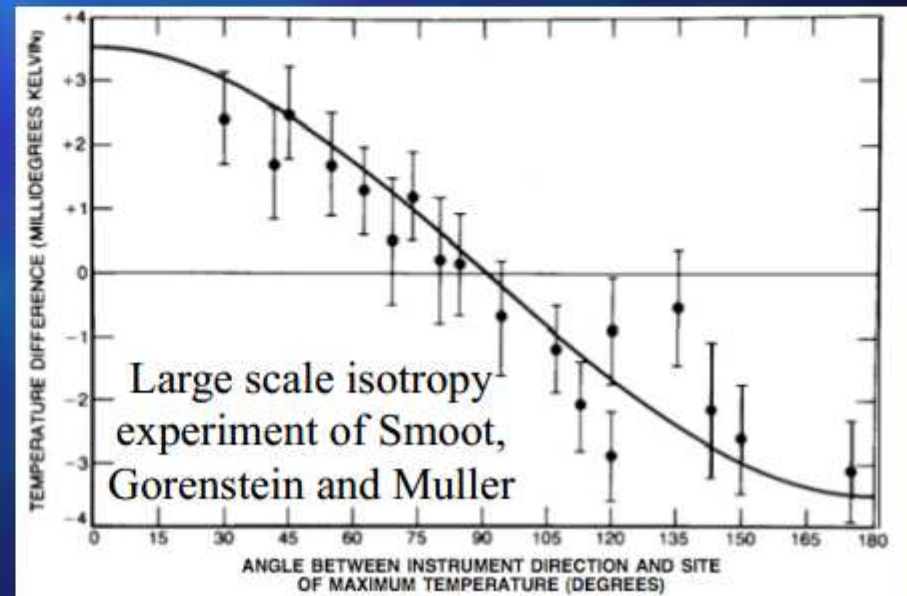
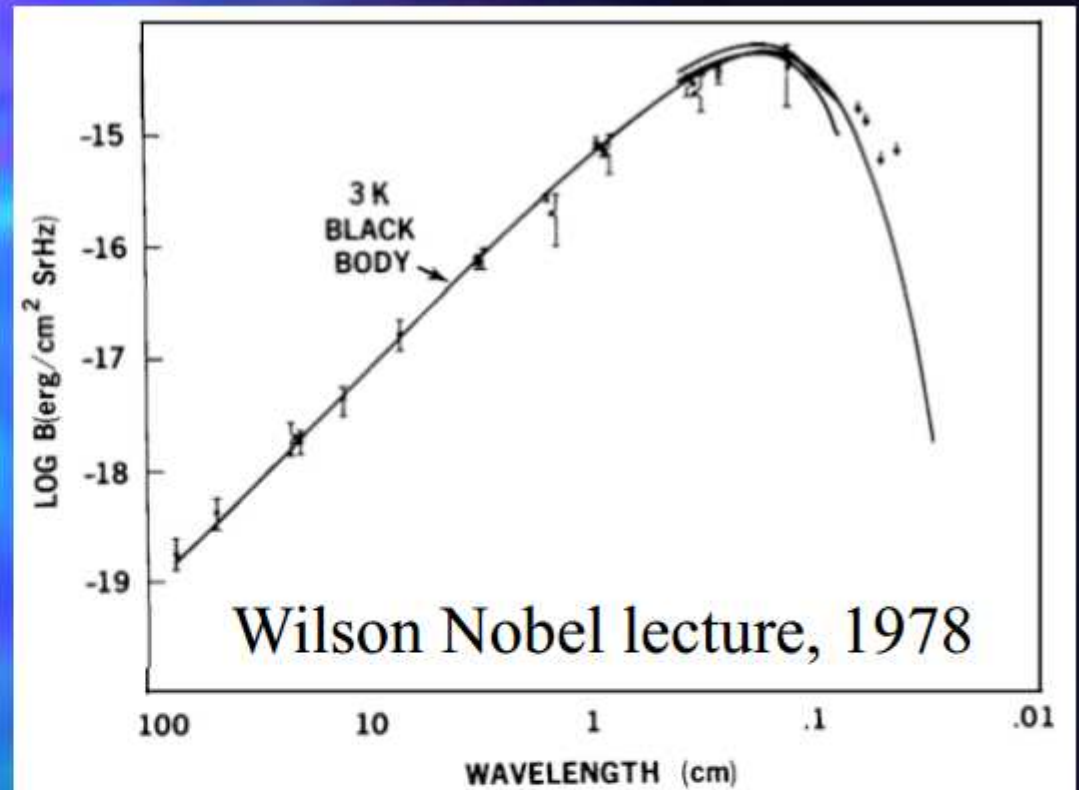


Systeme de réception
de TV par satellite =
instrument hétérodyne
à 10GHz!

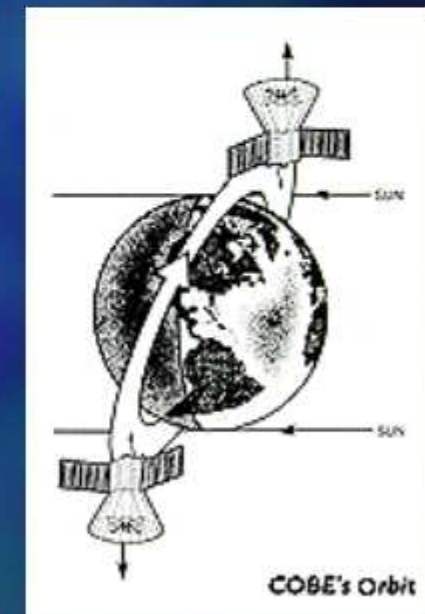
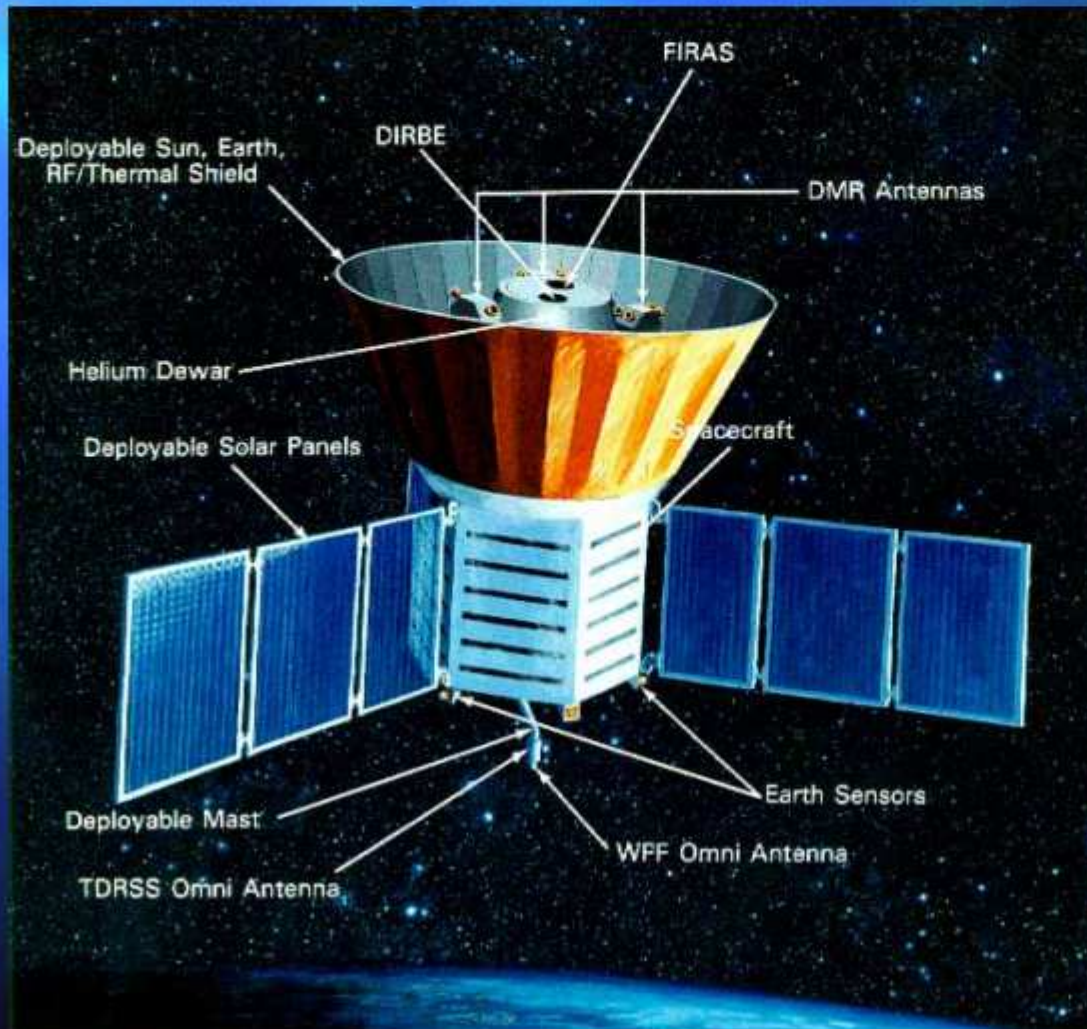
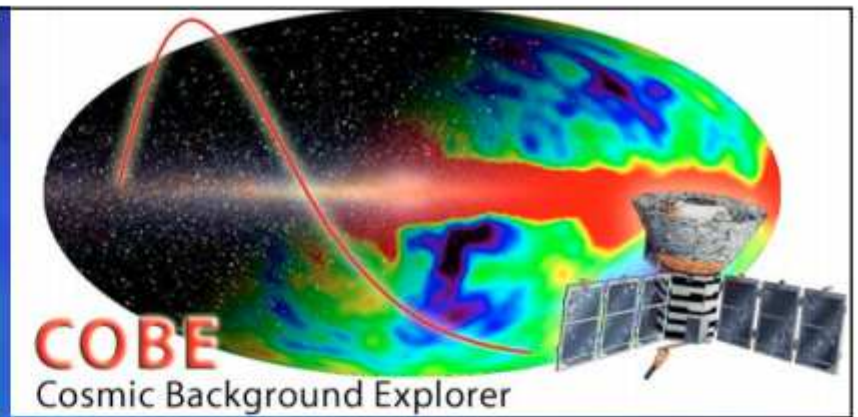


1965-1989

- Spectre
- Fluctuations de grande taille angulaire
 - Dipôle
- Expériences sol, fusée, ballon
 - Sensibilité limitée par la technologie

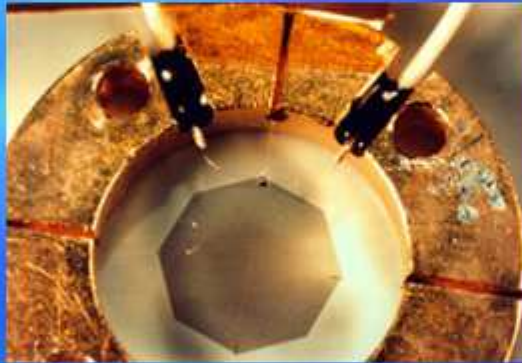


Le satellite COBE (NASA, 1989)

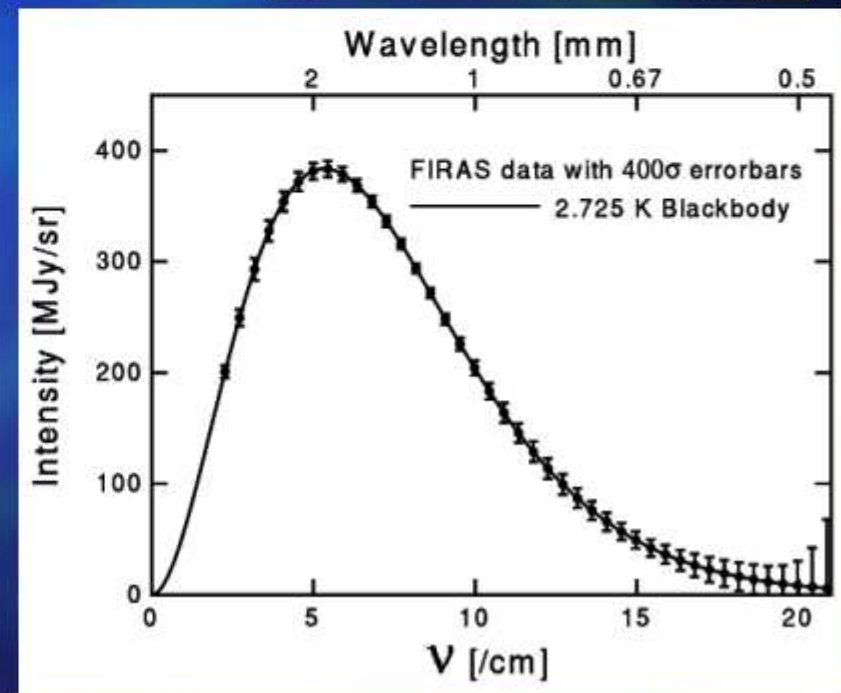


COBE-FIRAS

- Interféromètre de Michelson
 - 4 bolomètres à 1.5K

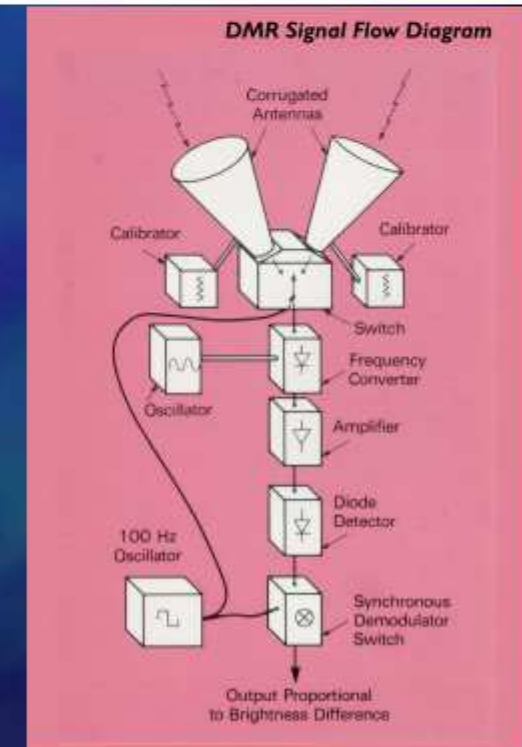
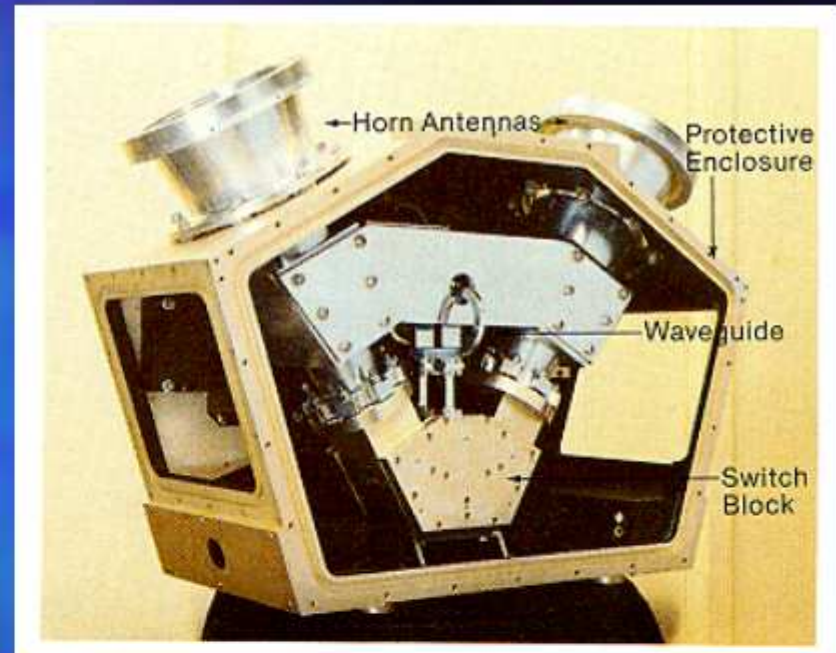


- Corps noir de référence
- CMB = corps noir à $2.725\text{K} \pm 0.002\text{K}$!



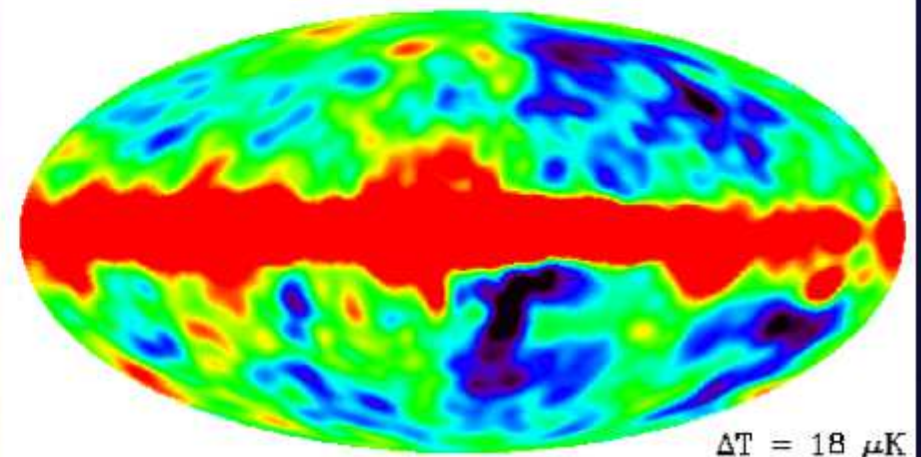
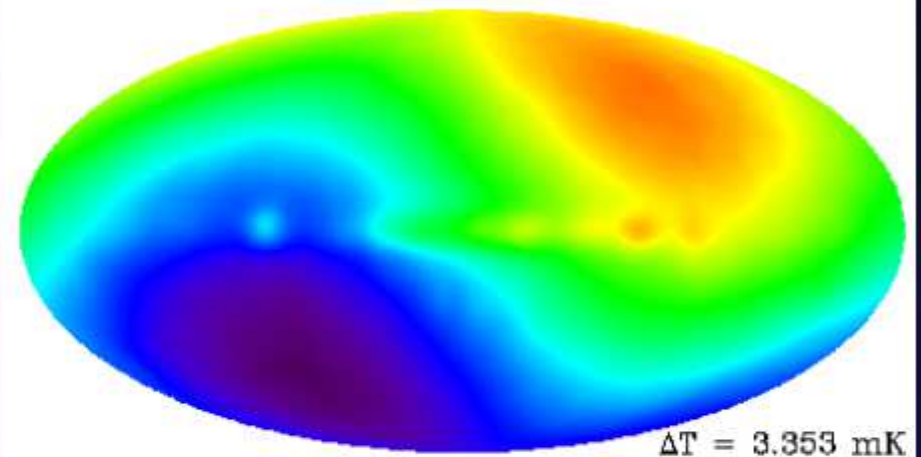
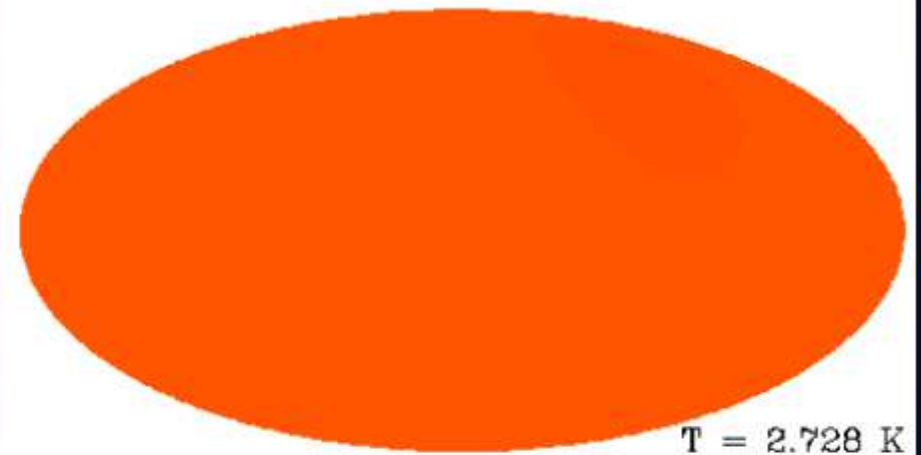
COBE-DMR

- Instrument radio
 - 31.5GHz, 53GHz, 90GHz
 - Refroidi à 300K pour le 31.5GHz et 140K pour les autres
 - Sensibilité ~ 25mK
 - Mesure différentielle
 - Résolution angulaire d'environ 7°



Résultats COBE

- Spectre de corps noir
 - $T = 2.725\text{K} \pm 0.002\text{K}$
- Fluctuations d'environ 0.001%
 - Anisotropies
 - L'univers était très homogène!



Nobel physique 2006

J.C. Mather
G.F. Smoot
« Pour leurs
découvertes de la
nature de corps noir
et des anisotropies
du rayonnement
diffus cosmique
micro-onde »



The Nobel Prize in Physics 2006

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



Photo: NASA

John C. Mather

🏆 1/2 of the prize

USA

NASA Goddard Space
Flight Center
Greenbelt, MD, USA

b. 1946



Photo: R. Kaltschmidt/LBNL

George F. Smoot

🏆 1/2 of the prize

USA

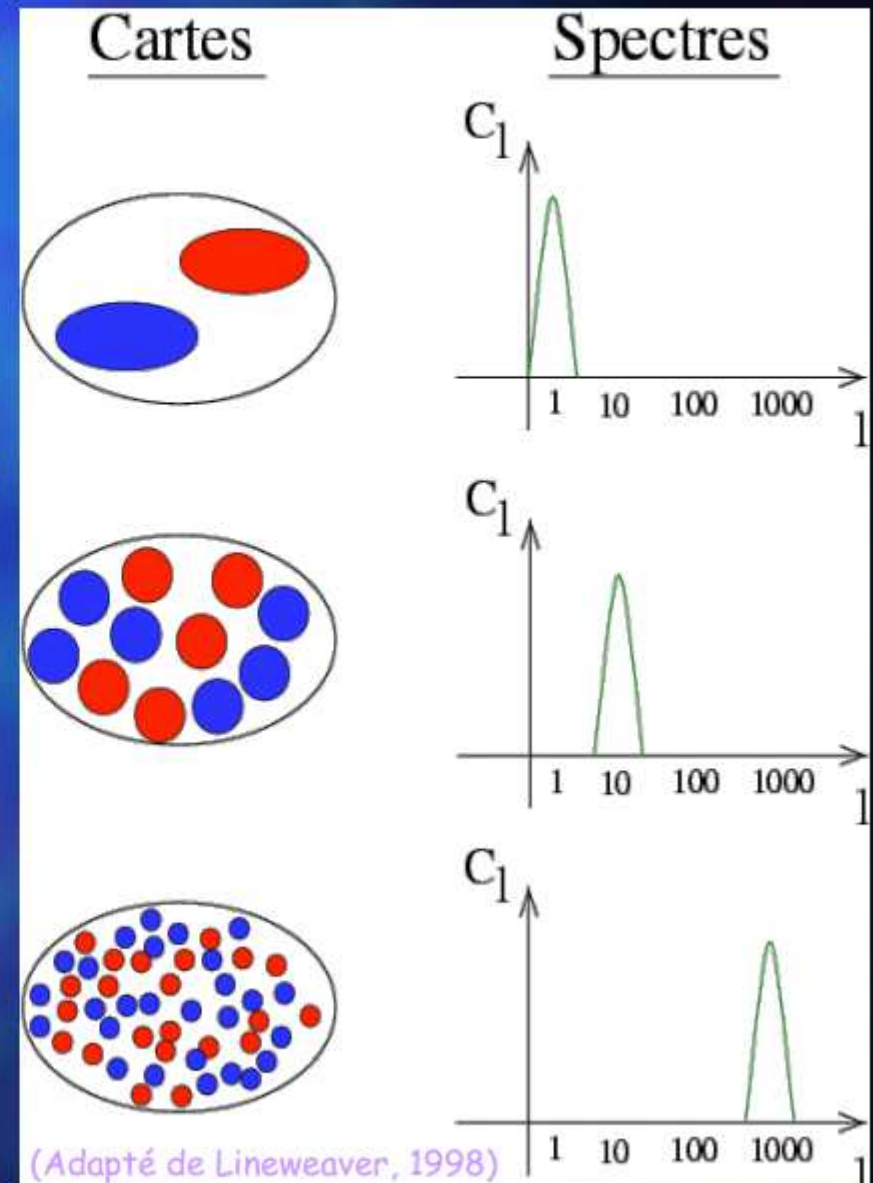
University of California
Berkeley, CA, USA

b. 1945

Description des fluctuations du rayonnement fossile

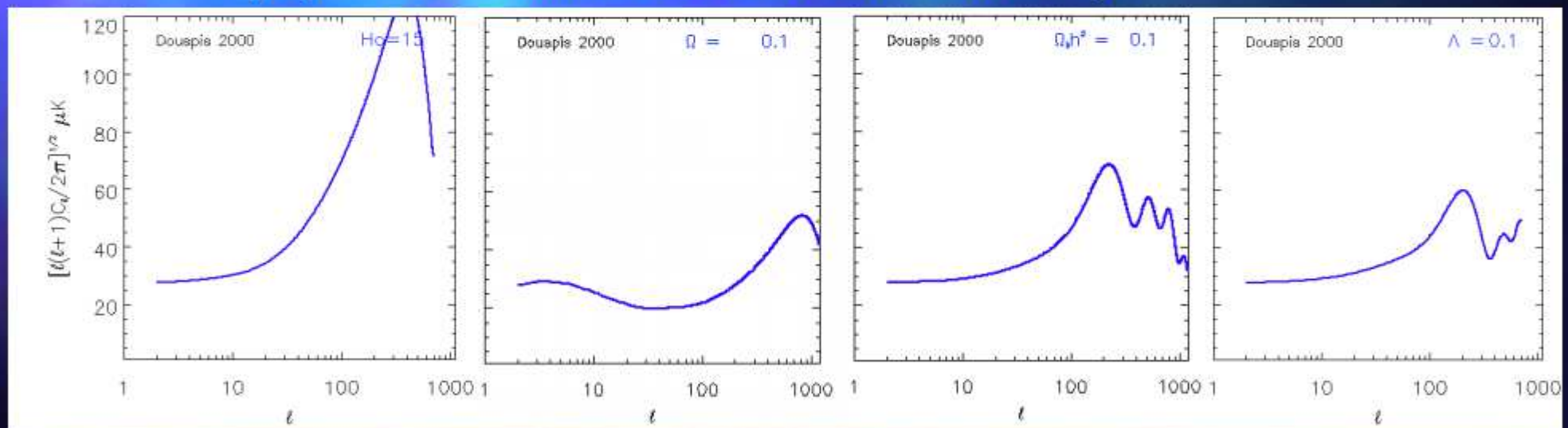
- Spectre de puissance angulaire
 - \sim nombre de fluctuations en fonction de leur taille
- Courbe C_l
 - l est inversement proportionnel à la taille angulaire

$$\theta \approx 1^\circ \Leftrightarrow l \approx 200$$



Les fluctuations du CMB et les paramètres cosmologiques

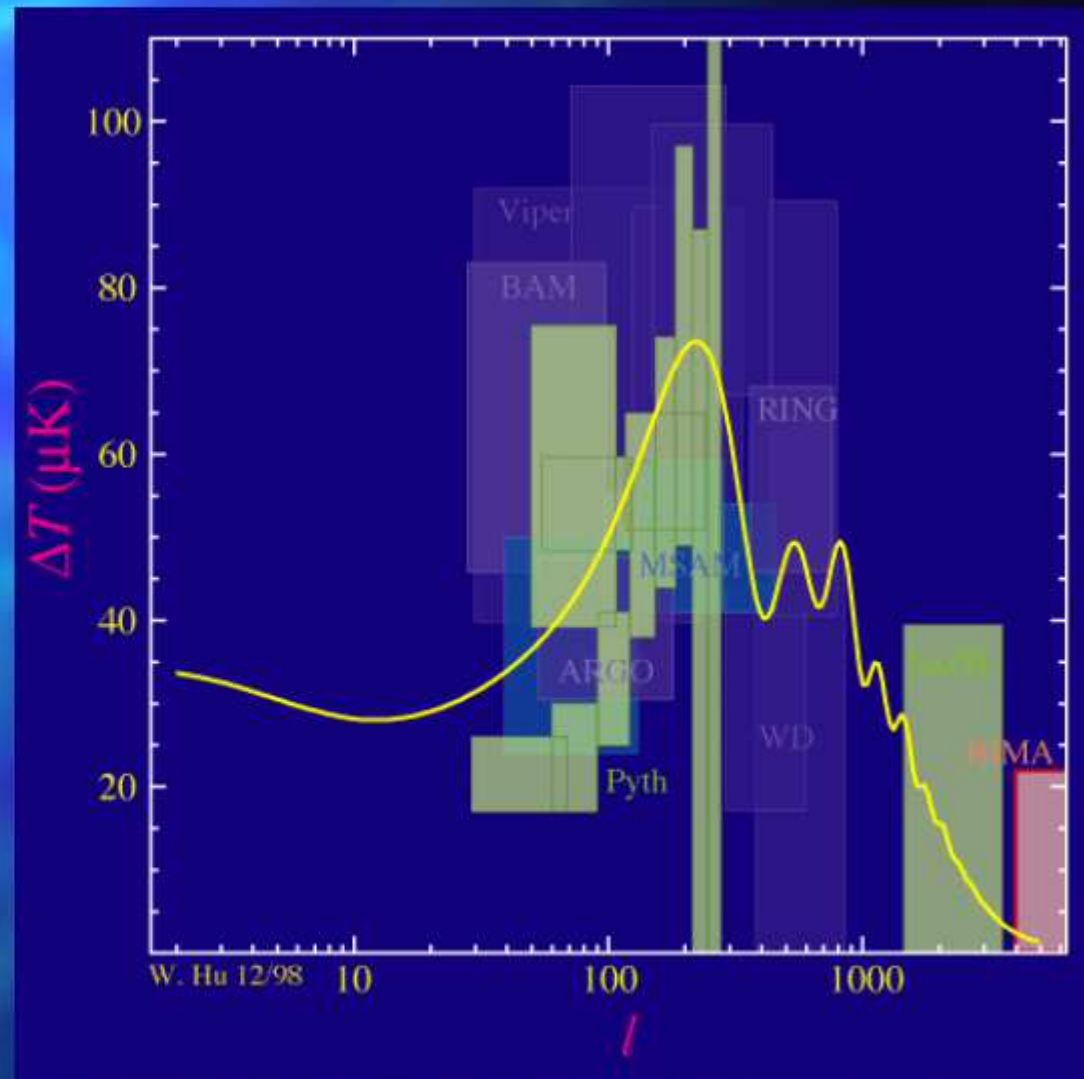
- Simulation de l'Univers primordial
 - Courbe Cl théorique dépend des paramètres cosmologiques (équations d'Einstein-Friedmann- Lemaitre):



- Comparaison Cl mesuré avec Cl théorique
⇒ Valeur des paramètres cosmologiques!

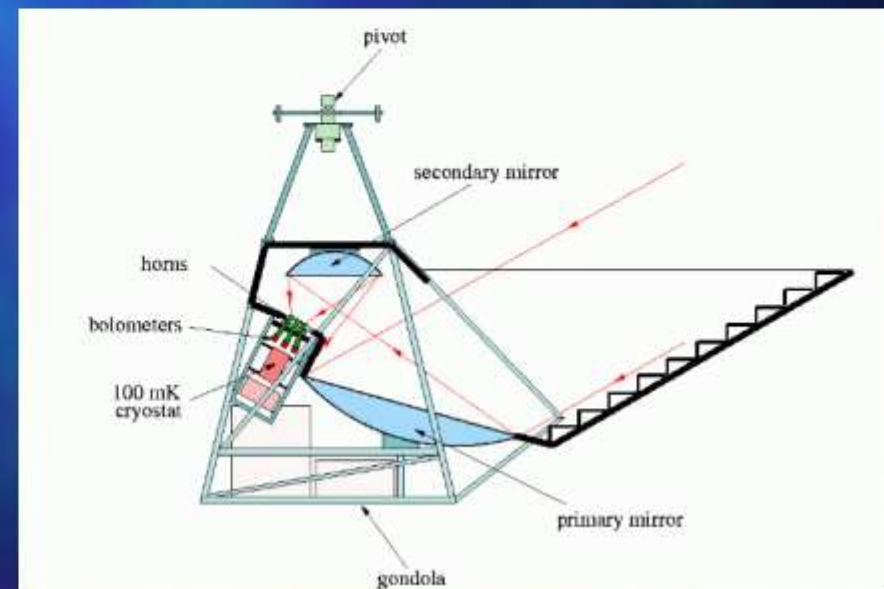
COBE + mesures sols (1989-1998)

- Instruments encore trop peu sensibles...
- Distingue t-on le 1er pic??



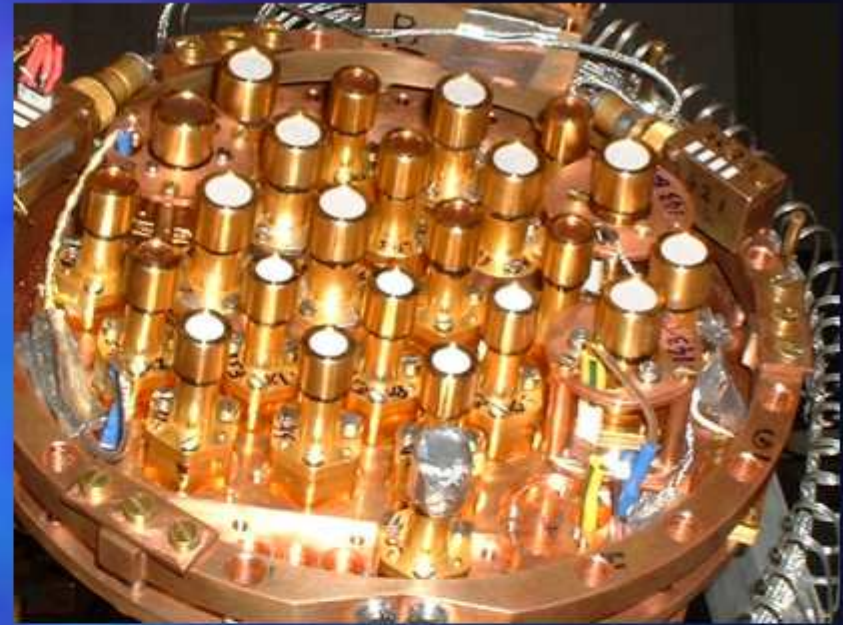
Les ballons stratosphériques (1997-2002)

- Expériences bolométriques
 - Boomerang (Caltech - Rome)
 - Maxima (Berkeley)
 - Archeops (collaboration française)

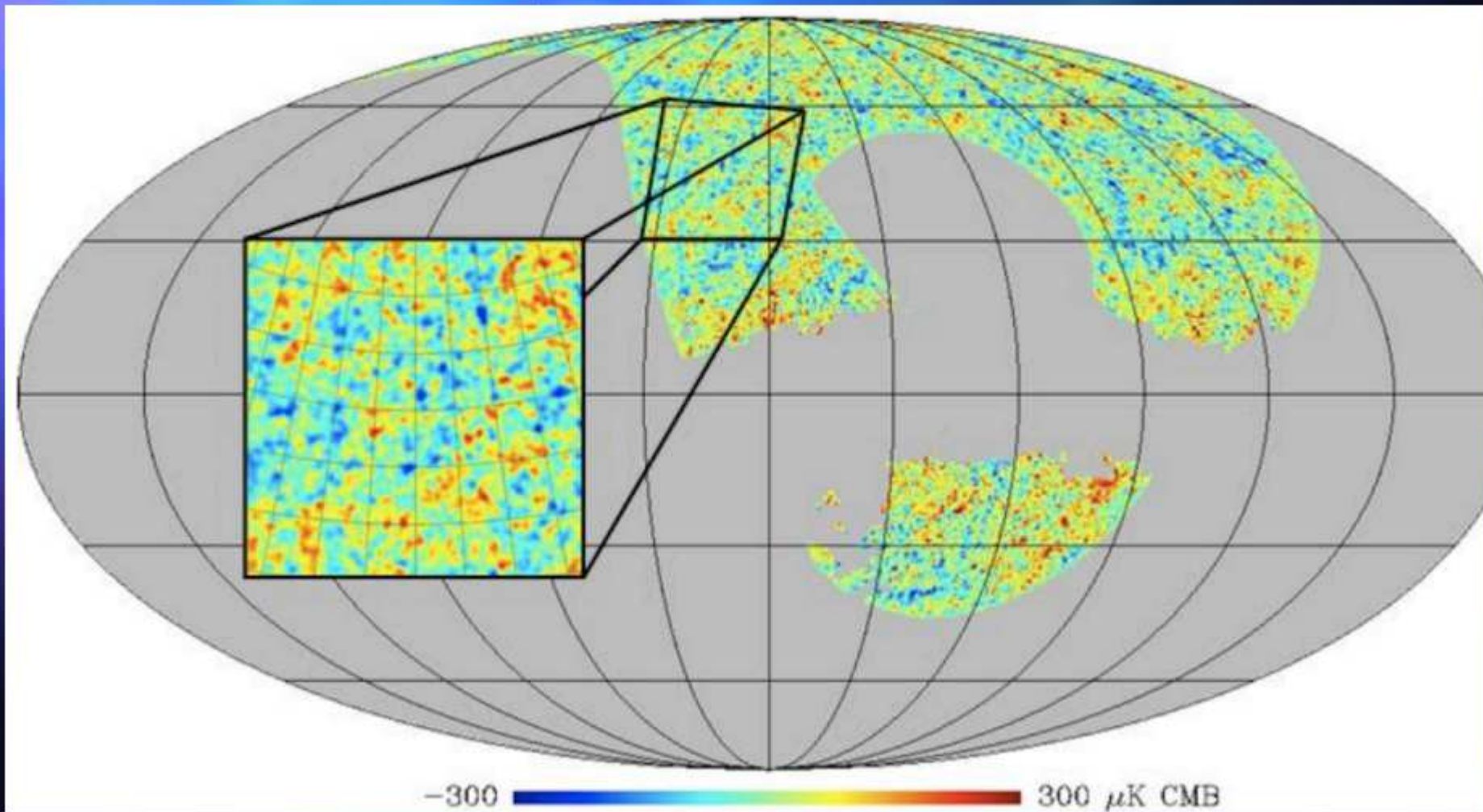


Archeops

- 23 bolomètres refroidis à 0.1K
 - Démonstrateur Planck-HFI
 - Résolution angulaire d'environ 10-12 arcmin
 - Sensibilité $\sim 100\mu\text{K}$
 - Stabilité basse fréquence accrue



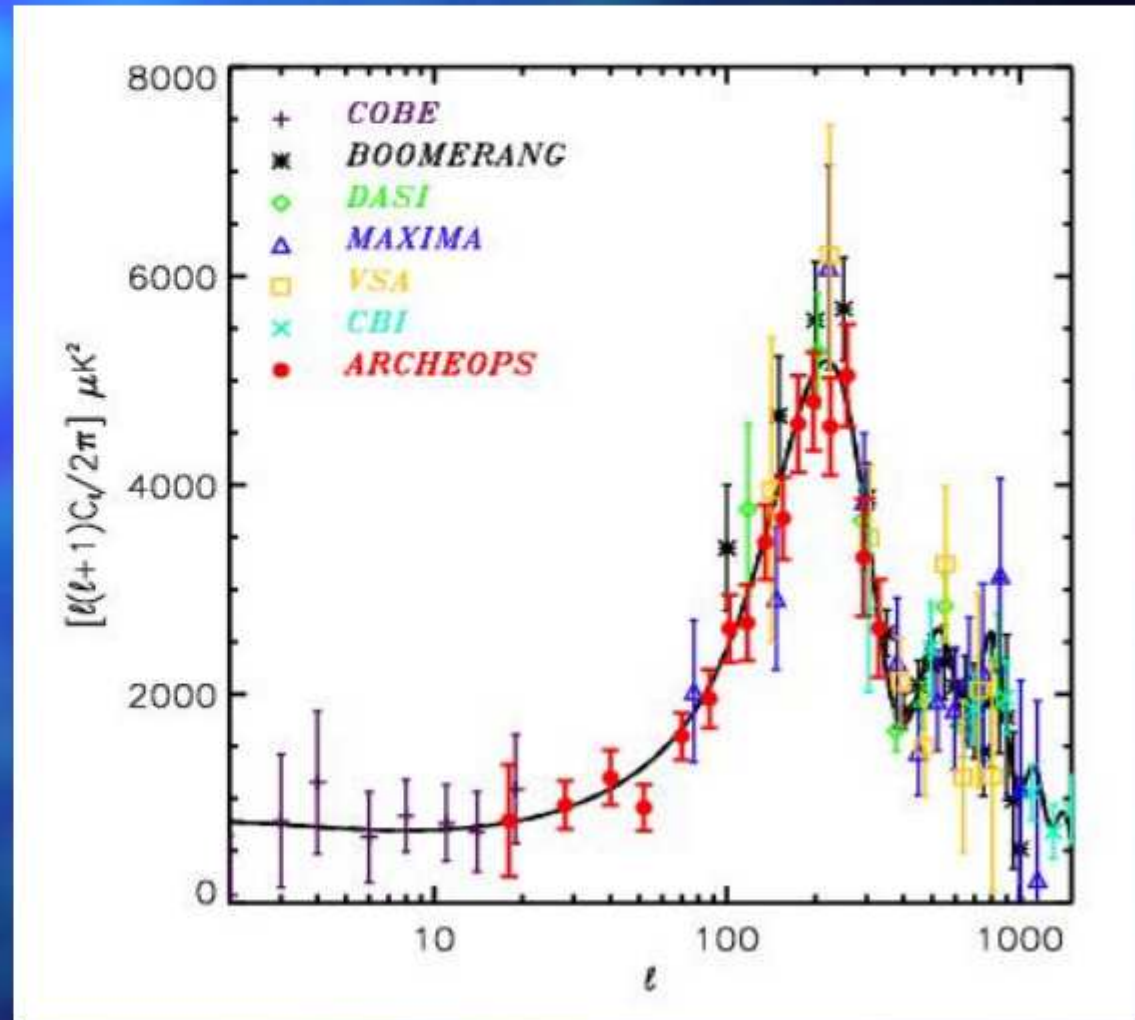
Carte Archeops



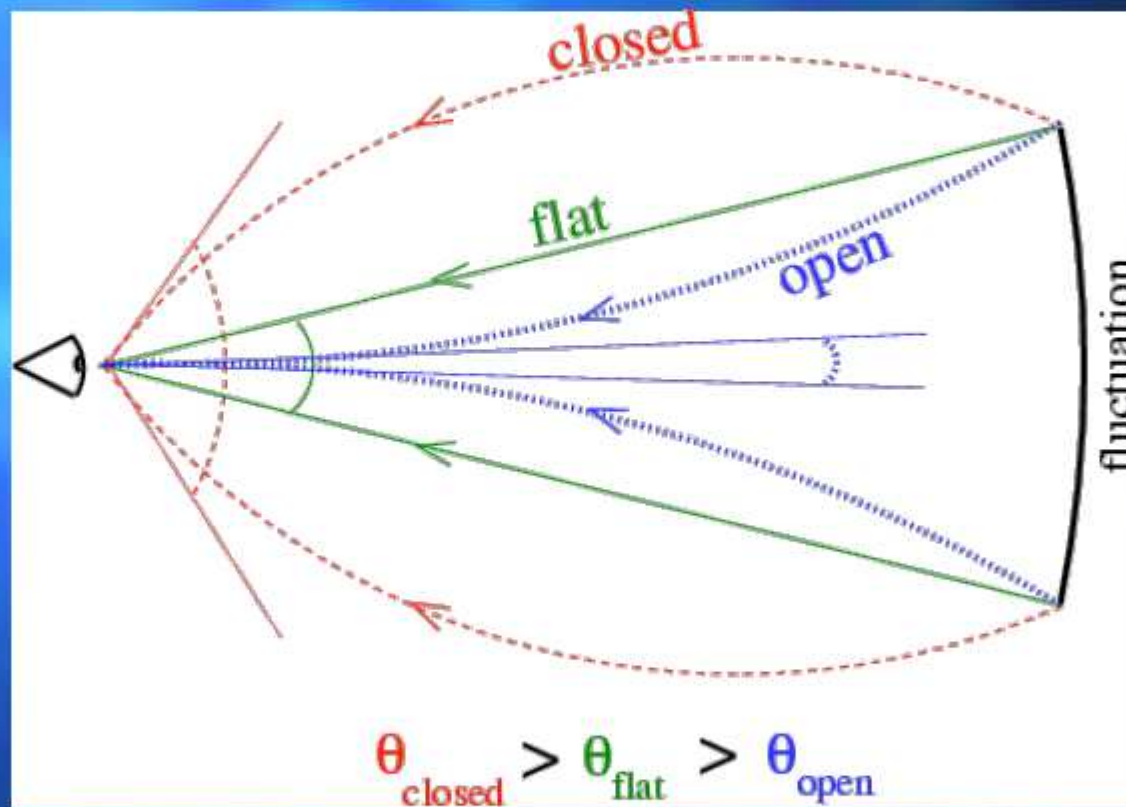
Résultats des expériences ballons (~2002)

■ Le 1^{er} pic est clairement visible!

- ✓ $\Omega_{\text{tot}} = 1.00$
- ✓ $\Omega_{\Lambda} = 0.70$
- ✓ $\Omega_b h^2 = 0.020$
- ✓ $H_0 = 70$
- ✓ $n = 1.00$
- ✓ $Q = 18 \mu\text{K}$
- ✓ $\tau = 0$



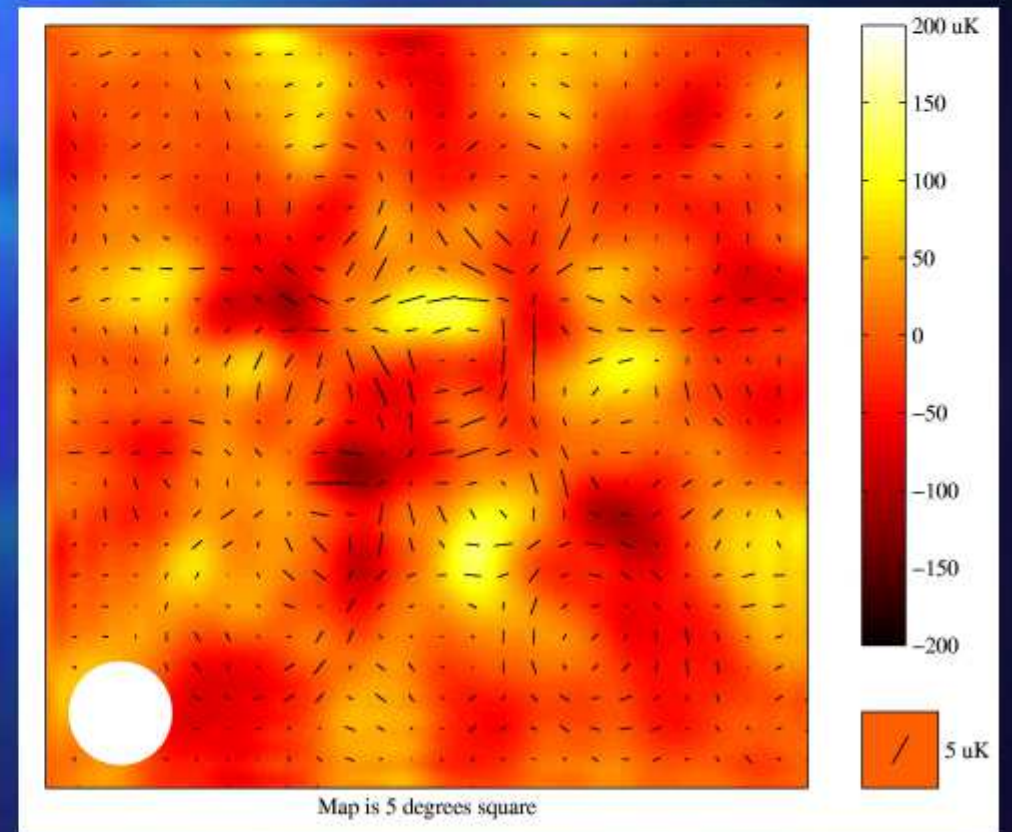
Impact sur la géométrie de l'Univers: plat!



La position du 1er pic est une mesure de Ω_{tot}

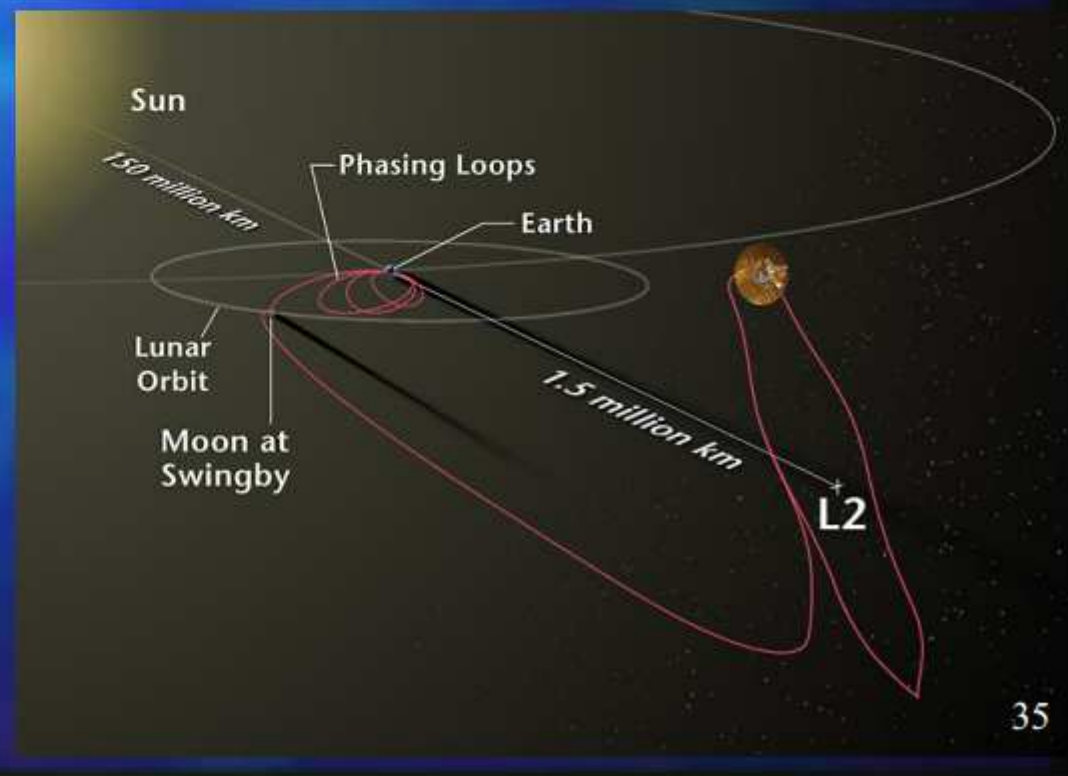
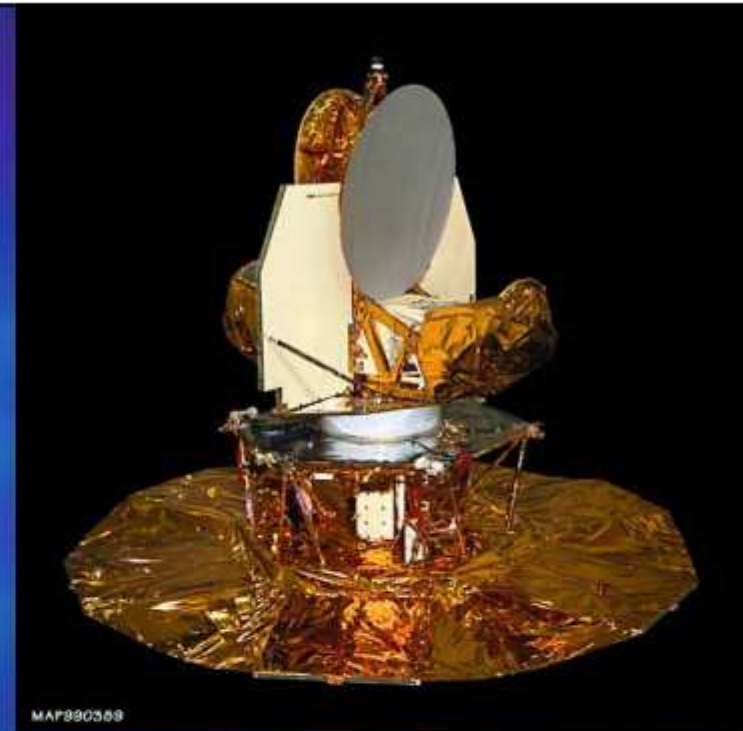
DASI 2002: la polarisation rayonnement fossile

- Environ 10% des photons du CMB sont polarisés!
- Information complémentaire aux fluctuations en intensité

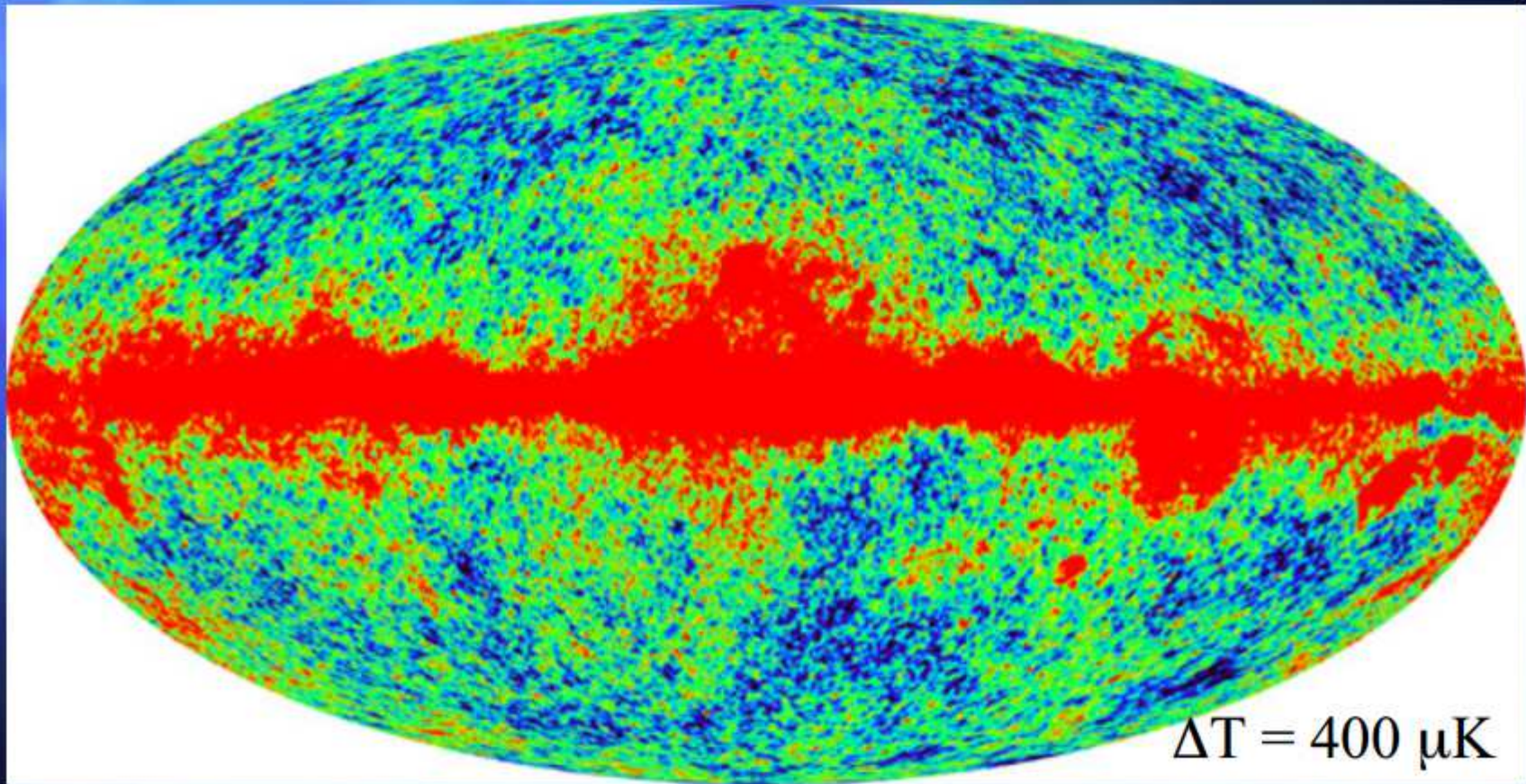


Satellite WMAP (NASA, 2001)

- Longueurs d'ondes:
3.2mm à 1.3cm
- Détecteurs radio
refroidis à ~50K
 - Mesure différentielle
 - Sensibilité ~ 1mK
en 1s



Les observations de WMAP

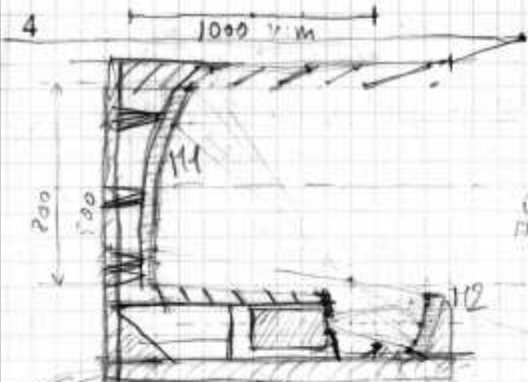


hypothèses :- Transmission optique froide $\tau = 0.3$; $T_{opt} = 0.3K$

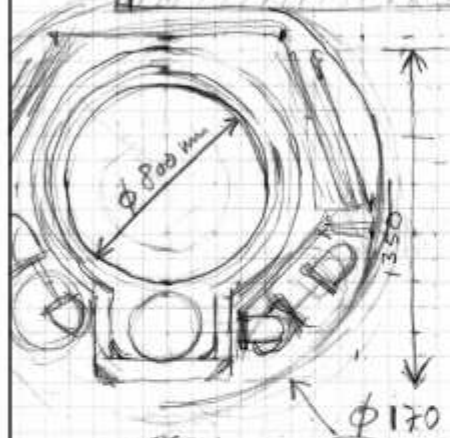
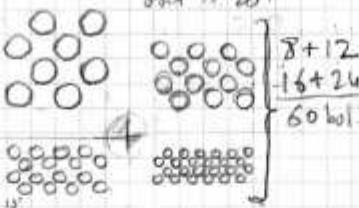
- Telescope $T = 70K$ $\epsilon = 10^{-2}$

- Etalons = A_{max}^2 pour chaque bande (1500, 1800, 1200, 200)

Ce qui donne de champ de $(20^\circ/15^\circ/10^\circ/7^\circ)$ pour $\Delta\theta = 50cm$ (20) ou $(22^\circ/21^\circ/14^\circ/10^\circ)$ pour $\Delta\theta = 36cm$ (10)

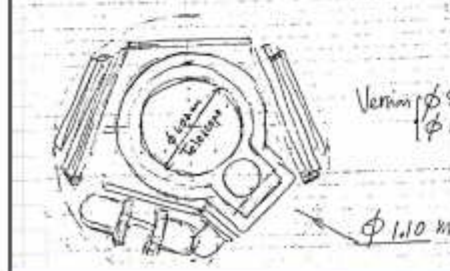
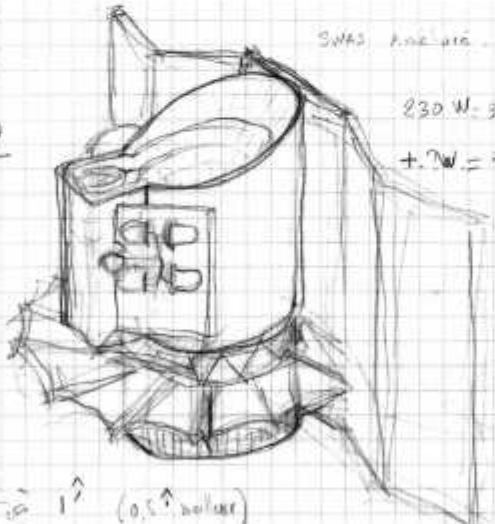
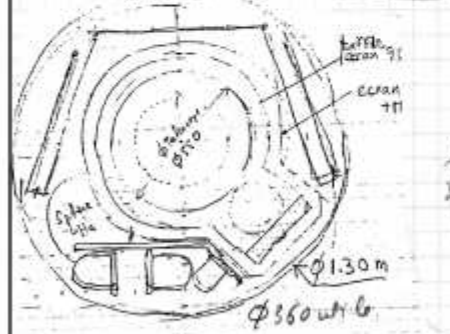


Plan focal Primaire
 $\phi_{eff} = 1.8 AN$
 $\phi_{eff} = 1.2 \times 2.4 \times 1.6$
 doit $\approx 20^\circ$



en version $\phi 800$

10 bolomètres 10 dirif 93



ΔV	$2.75 \cdot 10^{11}$	$1.25 \cdot 10^{11}$	$8.5 \cdot 10^{10}$	$9.7 \cdot 10^{10}$
Bande	0.5 - 0.2	0.8 - 1.2	1.2 - 1.8	1.8 - 2.5
	W_{ph} NEP _{ph}	W_{ph} NEP _{ph}	W_{ph} NEP _{ph}	W_{ph} NEP _{ph}
Contrib. bolomètre	$T=2.7K E=1$ 3.3E-14 4.4E-18	1.6E-13 7.3E-18	4.4E-13 1.1E-17	4.4E-13 2.8E-18
Contrib. Tel.	$T=80K E=10^{-2}$ 2.E-12 4.E-17	1.1E-12 2.2E-17	7.8E-13 1.5E-17	4.E-13 1E-17
TOTAL	W_{tot} / NEP_{tot} 2.E-12 4.E-17	1.3E-12 2.3E-17	1.1E-13 1.8E-17	2.E-13 1.35E-17
Sensibilité Théorique (Mjans) $\mu K \cdot H$ (RJ)	$2.2 \cdot 10^{-12}$ 2.E-12	16	17	20
Sensibilité avec modulation 2 détecteurs	2.3 $\mu K(RJ)$ H_2^2	2.4 $\mu K(RJ)$ H_2^2	2.8 $\mu K(RJ)$ H_2^2	3.3 $\mu K(RJ)$ H_2^2
Sensibilité par point de ciel (dans 1/30)	50cm / 1.6 1.6 μK RJ	50cm / 2.0 μK 1.4 μK RJ	3.6 μK 2.3 μK RJ	6.8 μK 4.3 μK RJ
ΔT 2 ans par 1000 de détecteurs (RJ)	60 μK 84 μK	28 μK 16 μK	2.3 μK 0.3 μK	6.3 μK 1.1 μK
ΔT Total $\mu K(3\sigma)$	16 μK 21.5	3.4	5.2 2.6 3.9	3.4 5.2
ΔB Total mJy	40 26	60	40 100 70	200 150

NB1: On suppose que les bolomètres ont un NEP $\leq 0.3 NEP_{ph}$ (de 5 à 10 $10^{-17} W \cdot H^2 \cdot s^{-1}$)

NB2 Effet de la modulation différentielle: sensibilité celle par paire de bolomètres pour chaque détecteur, $\eta_{mod} = 100\%$

Le signal est une différence, $\sigma_0 = \sqrt{2} \cdot \sigma_{mod}$

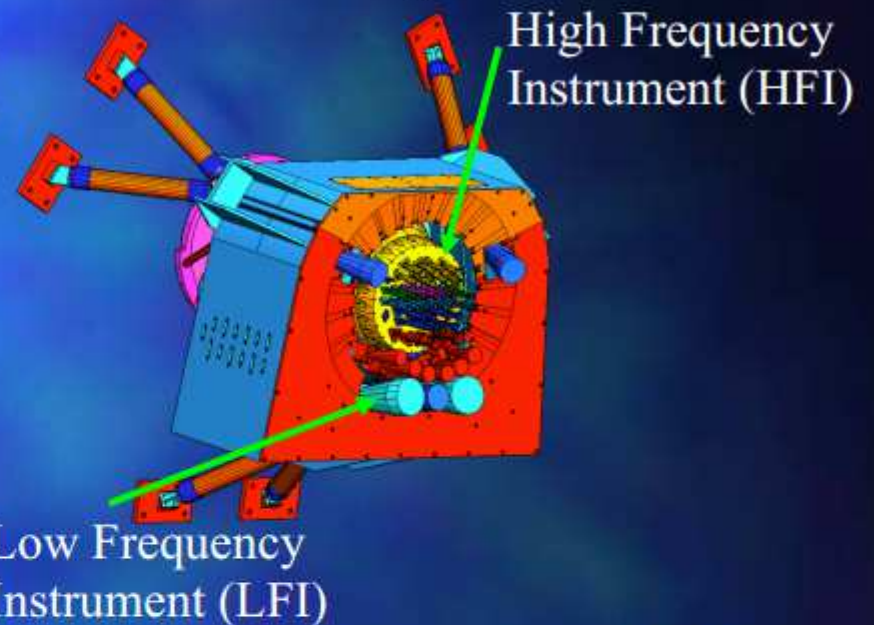
NB3: Temps d'intégr. $T_{int}/chop = 6 \cdot 10^7 \frac{\pi \phi_{eff}^2}{4\pi} = 6 \cdot 10^7 \phi_{eff}^2 = 0.91 \mu s$

temps d'intégration par champ

	28	20	15	13	7
	265	135	76	36	17
Temps d'observation	23	16.4	12.3	8	6

$$\Delta B = \frac{10^{26} NEP_{tot} \eta_{mod}}{2 \phi_{eff}^2 \Delta V A_{tot}}$$

La mission Planck: télescope et instruments focaux



■ Low Frequency Instrument (LFI):

- Radiomètres à 20K
- 30 à 70GHz
- Consortium sous resp. italienne

■ High Frequency Instrument (HFI):

- 52 bolomètres à 100mK
- 100GHz à 1THz
- Consortium sous resp. française (IAS)

- Orbite: L2
- Rotation: balayage du ciel





PLANCK



Satellite de 3ème génération

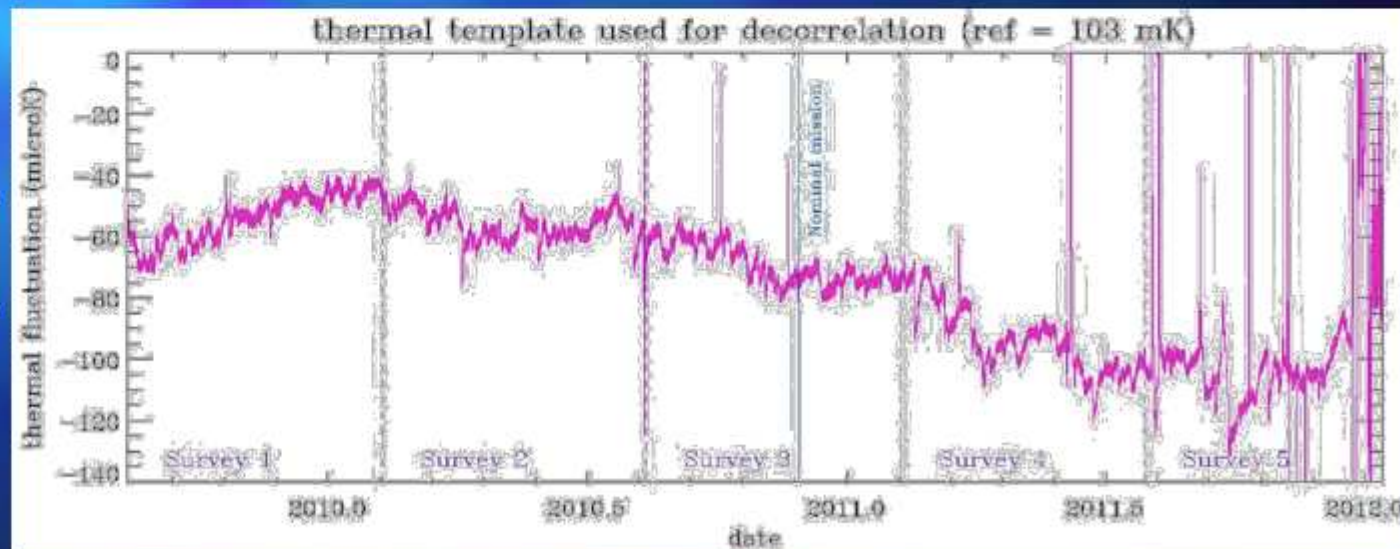


Les innovations de Planck-HFI



- Dilution 100mK spatialisable (IN-Air Liquide)
- Bolomètres ultra-sensibles (Caltech-JPL)
- Stabilité basses fréquences
 - Chaîne de détection
 - Thermique

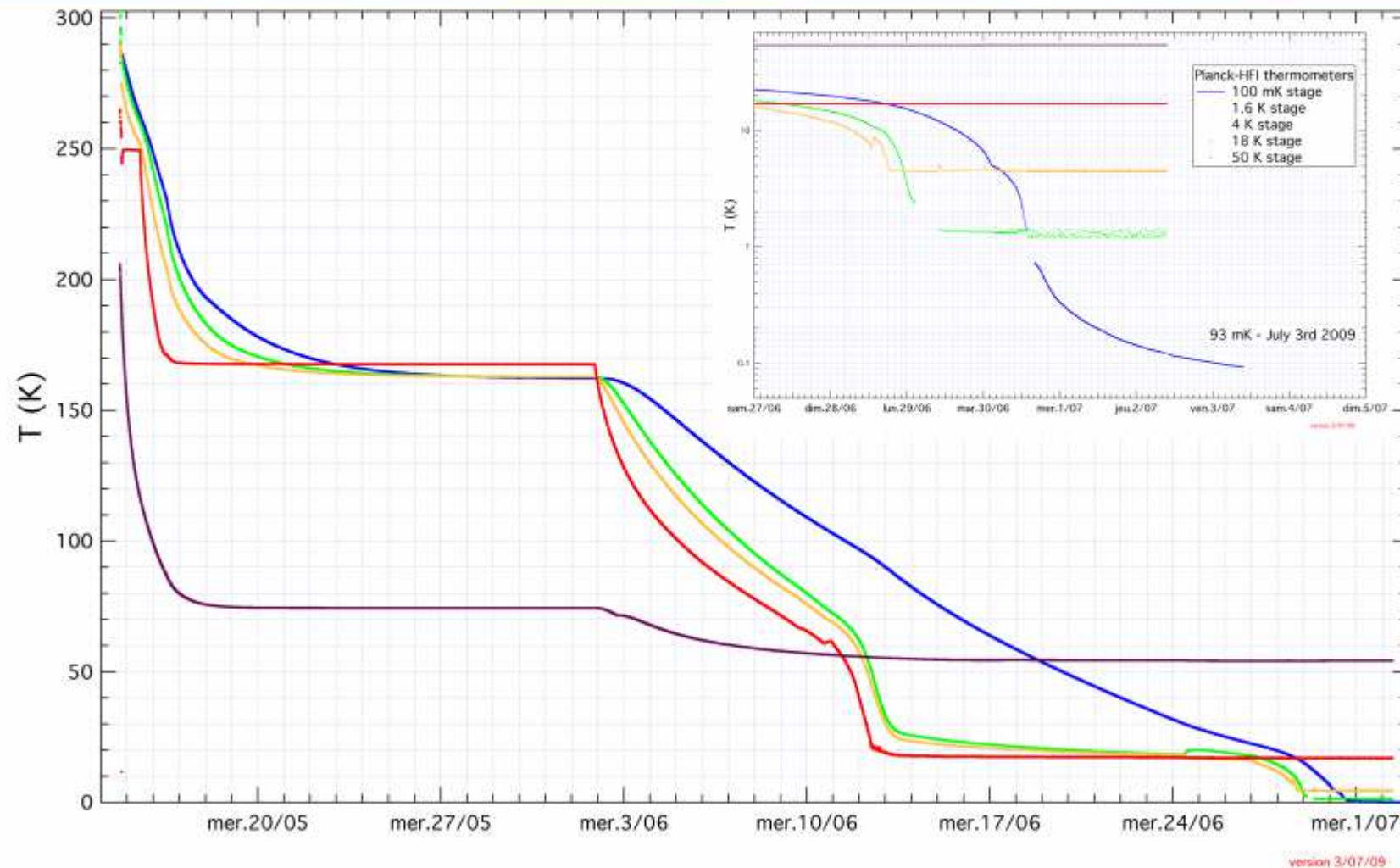
50 μ K/100mK
soit $\Delta T/T = 5 \cdot 10^{-4}$



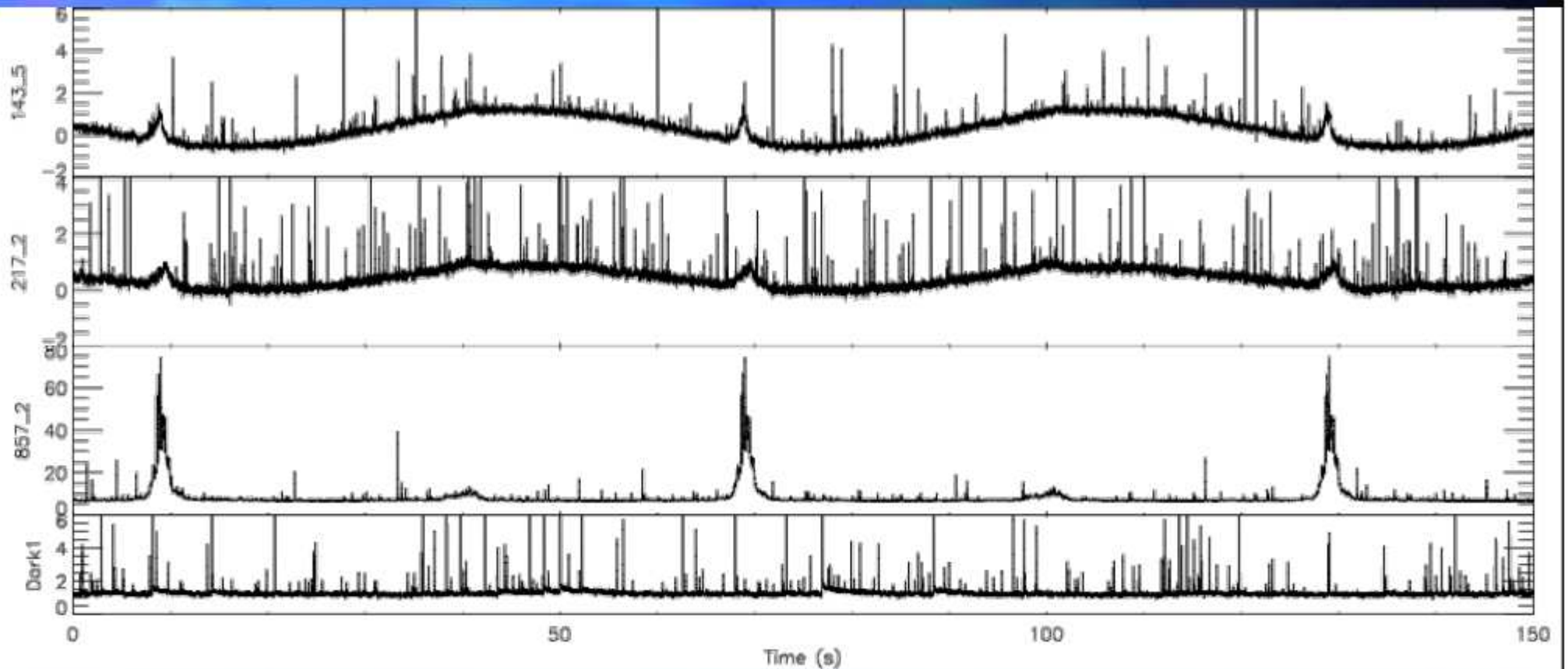
14 mai 2009
lancement Planck



Refroidissement de l'instrument en vol

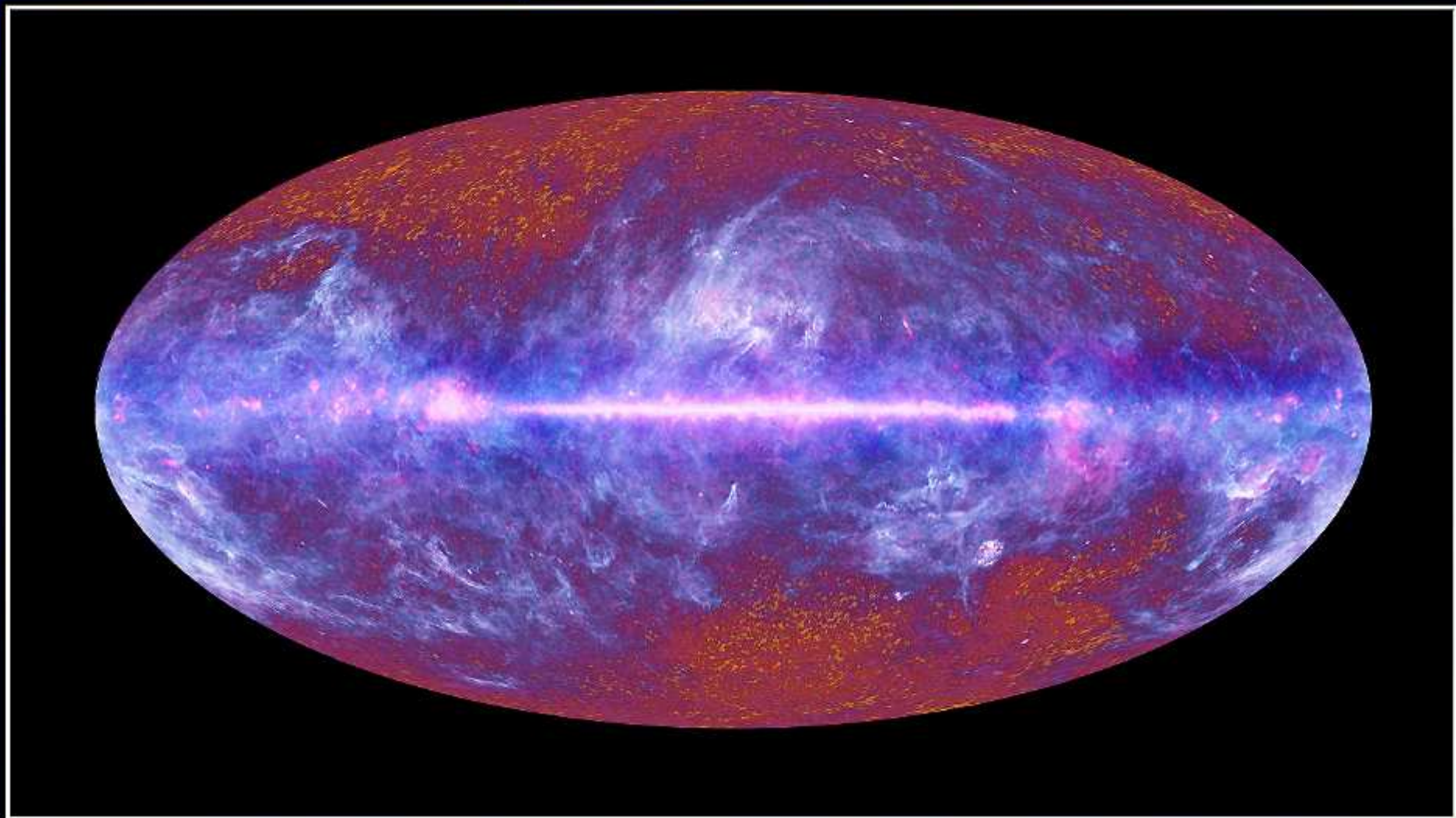


Planck-HFI: données bruts



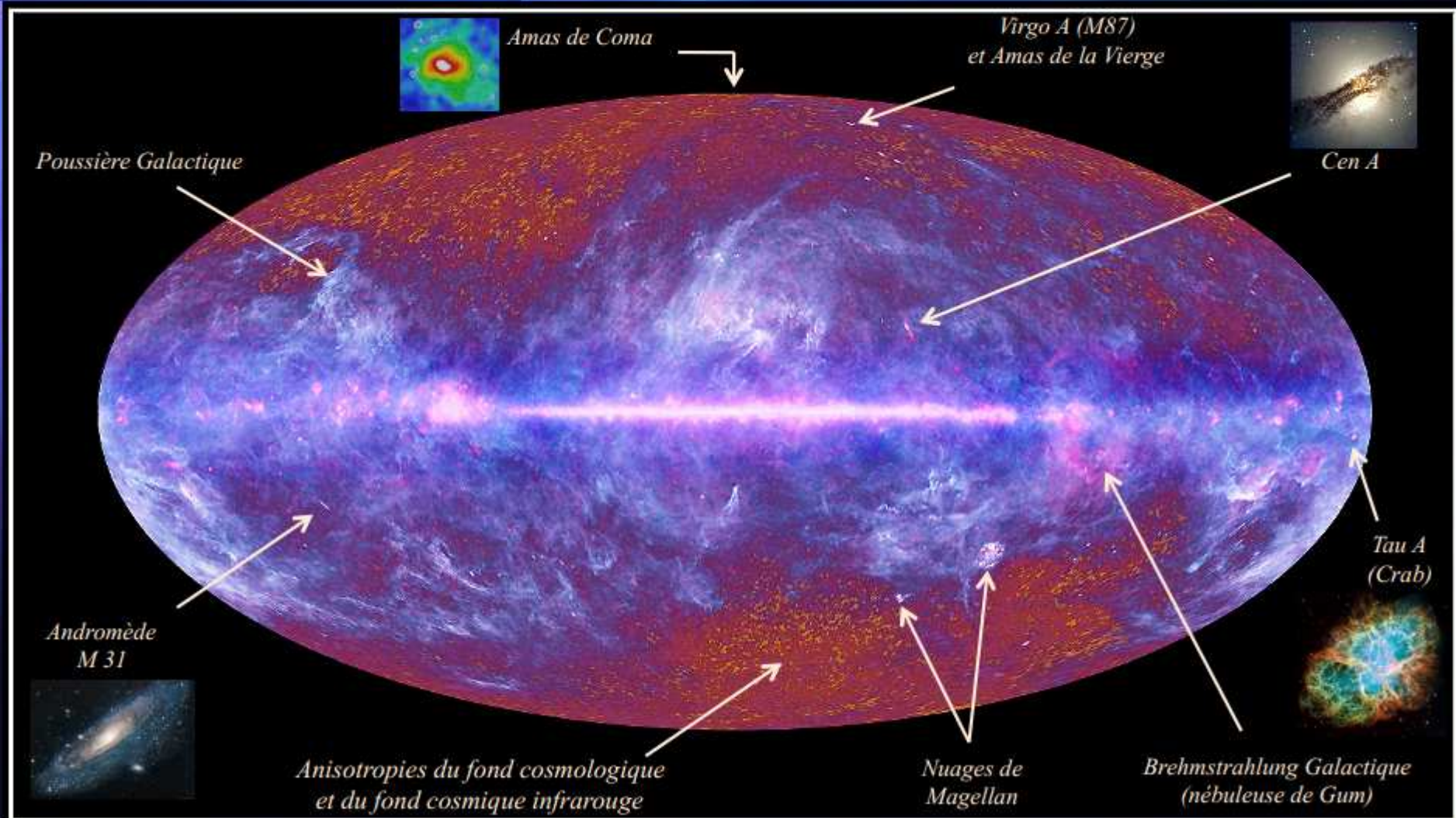


Le ciel vu par Planck

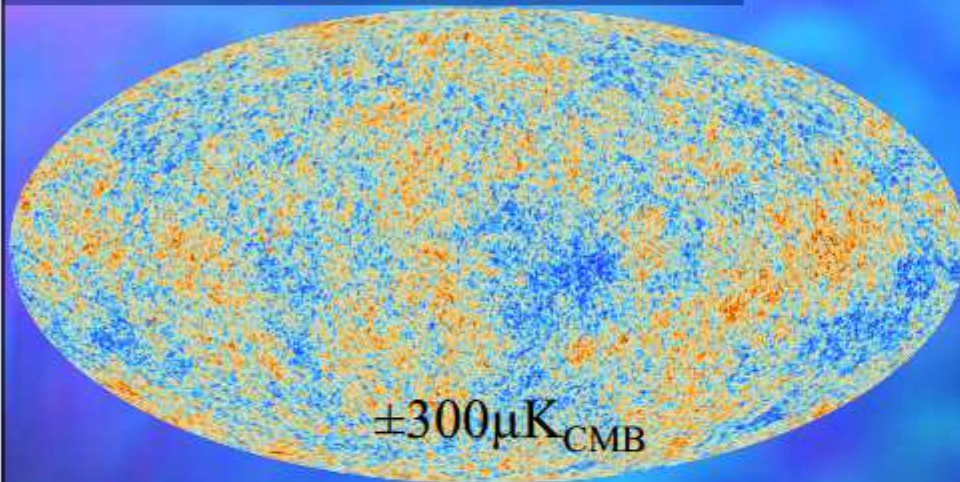




Le ciel vu par Planck



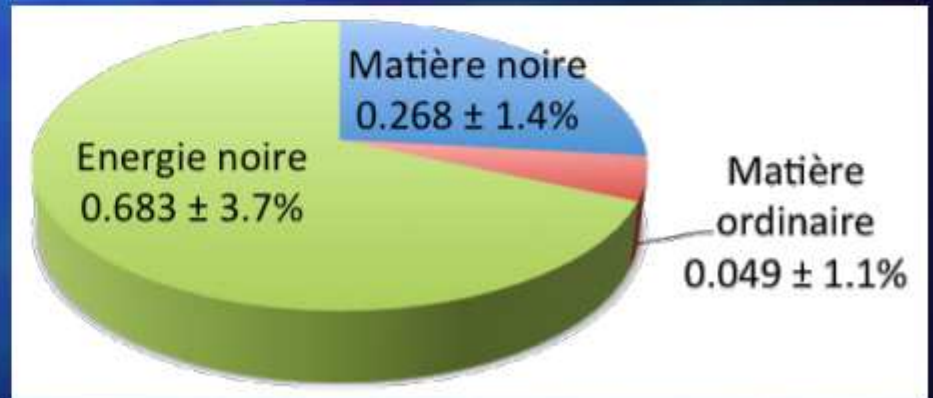
1^{er} résultats cosmologiques de Planck



Modèle Λ CDM Modèle Λ CDM Parameter	<i>Planck</i> +WP+highL+BAO	
	Best fit	68 % limits
$\Omega_b h^2$	0.022161	0.02214 ± 0.00024
$\Omega_c h^2$	0.11889	0.1187 ± 0.0017
$100\theta_{\text{MC}}$	1.04148	1.04147 ± 0.00056
τ	0.0952	0.092 ± 0.013
n_s	0.9611	0.9608 ± 0.0054
$\ln(10^{10} A_s)$	3.0973	3.091 ± 0.025

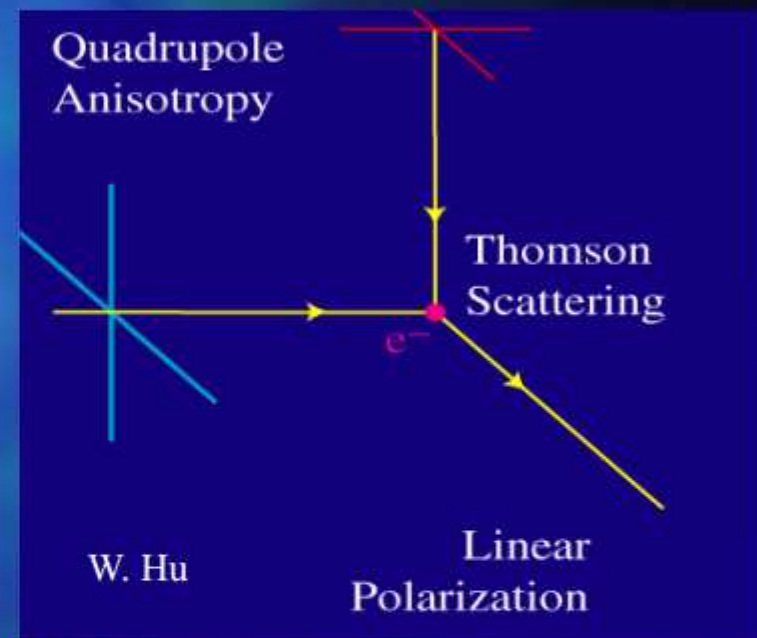
Inflation!

■ Composition de l'Univers connue au pourcent:



3. Vers la mesure précise de la polarisation du CMB

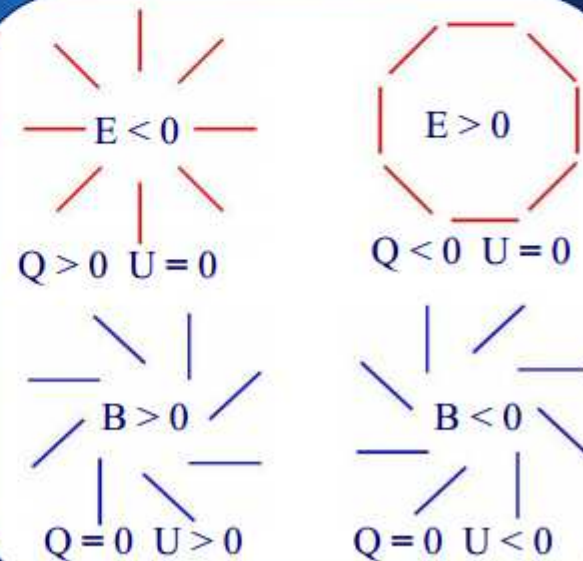
- Origine: diffusion Thomson au moment du découplage rayonnement-matière
- Requiert un rayonnement incident à l'électron qui soit anisotrope
 - Electron tombant dans une surdensité (fluctuations scalaires)
 - Déformation de l'espace par les ondes gravitationnelles (fluctuations tensorielles)
- Polarisation linéaire d'environ 10%



Caractérisation de la polarisation

- Paramètres de Stokes
 - Paramètres locaux
 - I: intensité totale
 - Q, U: polarisation linéaire
 - V: polarisation circulaire
- Modes E et B
 - Paramètres non locaux

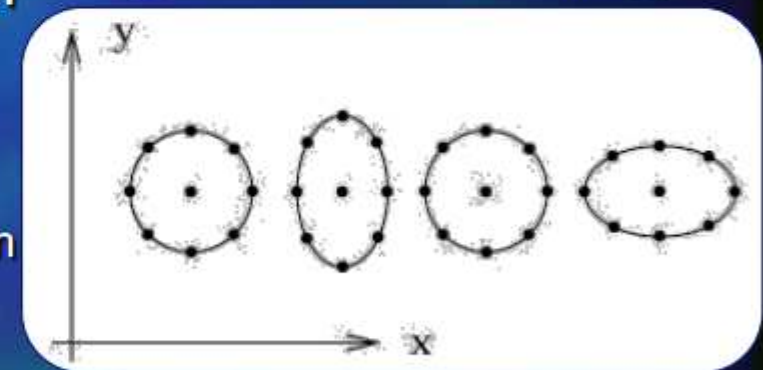
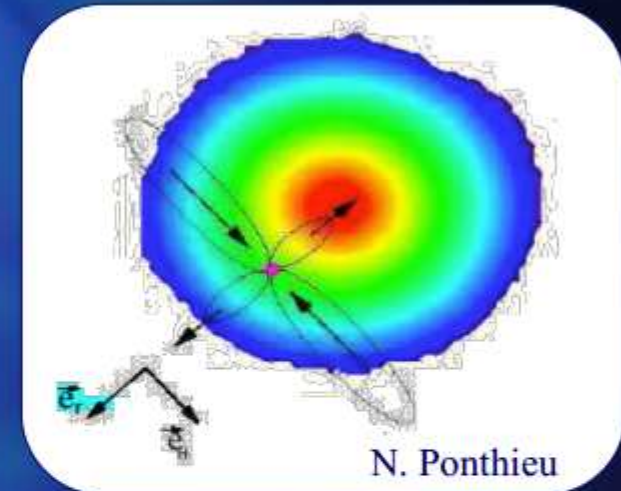
$$\begin{cases} I = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U = 2 \langle E_x E_y \cos \delta \rangle \\ V = 2 \langle E_x E_y \sin \delta \rangle \end{cases}$$



Origine physique des modes E et B

- *Modes scalaires*: fluctuations de densité
 - Anisotropies T et modes E
- *Modes tensoriels*: ondes gravitationnelles issues de l'inflation
 - Anisotropies T, modes E et modes B
 - **Modes B = signature des OG primordiales** (hors lensing)
 - Amplitude reliée à l'échelle d'énergie de l'inflation
 - Rapport tenseur sur scalaire $r = T/S$

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



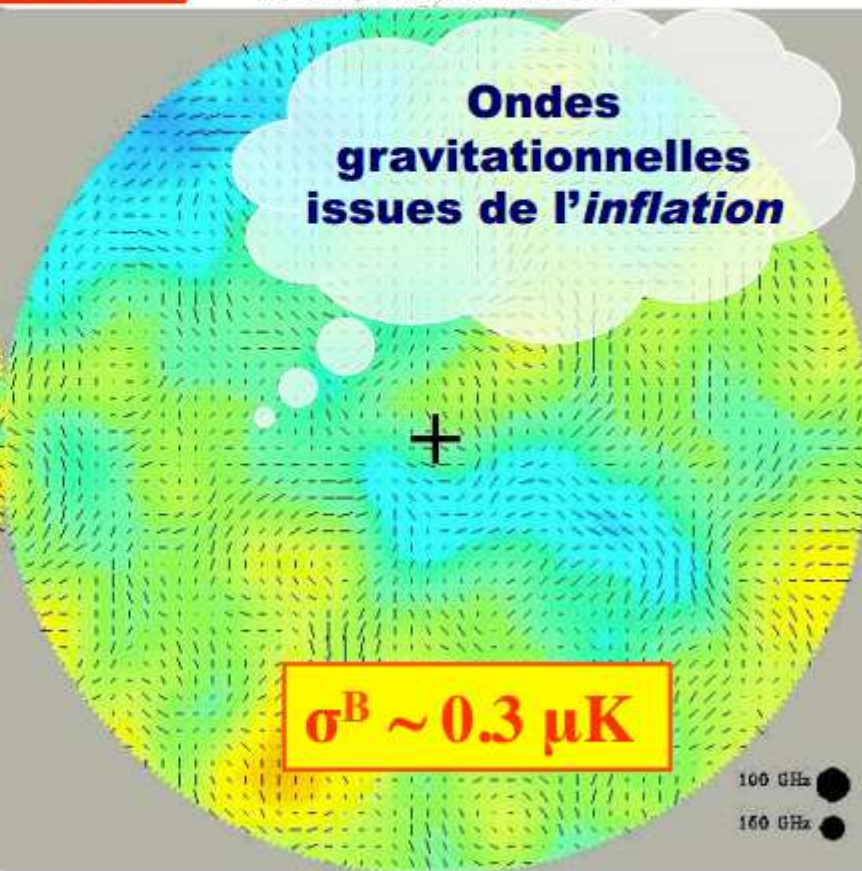
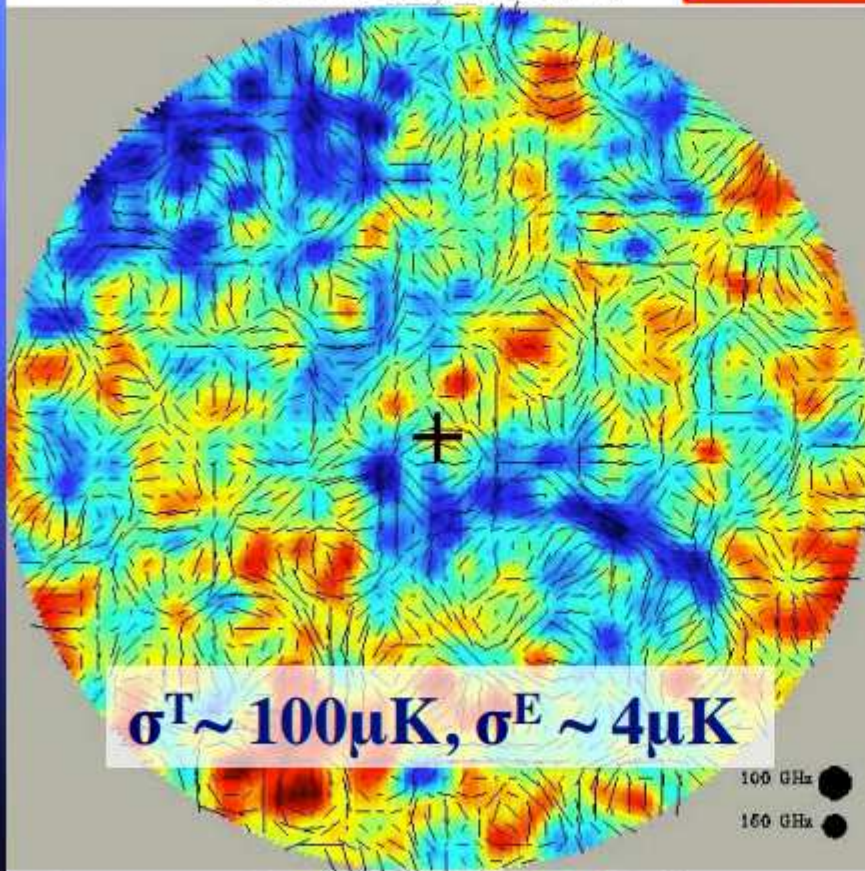
Polarisation du CMB

Scalar+Tensor Perturbations
42' beam, 30deg. diam. polar cap

$T/S=0.28$

Tensor Perturbations

42' beam, 30deg. diam. polar cap



3.53 μK

-200  200 μK

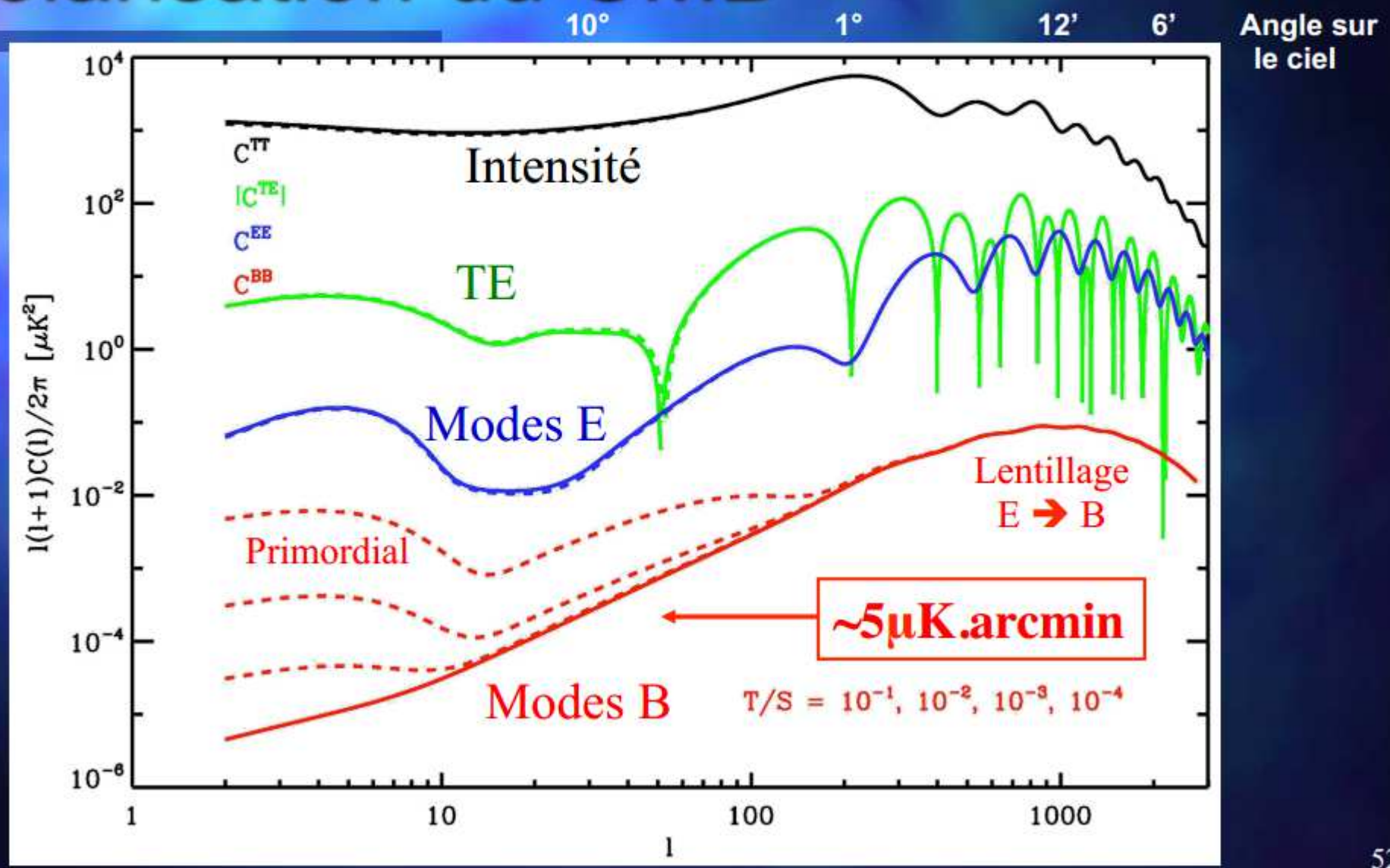
3.53 μK

-200  200 μK

100 GHz ●
150 GHz ●

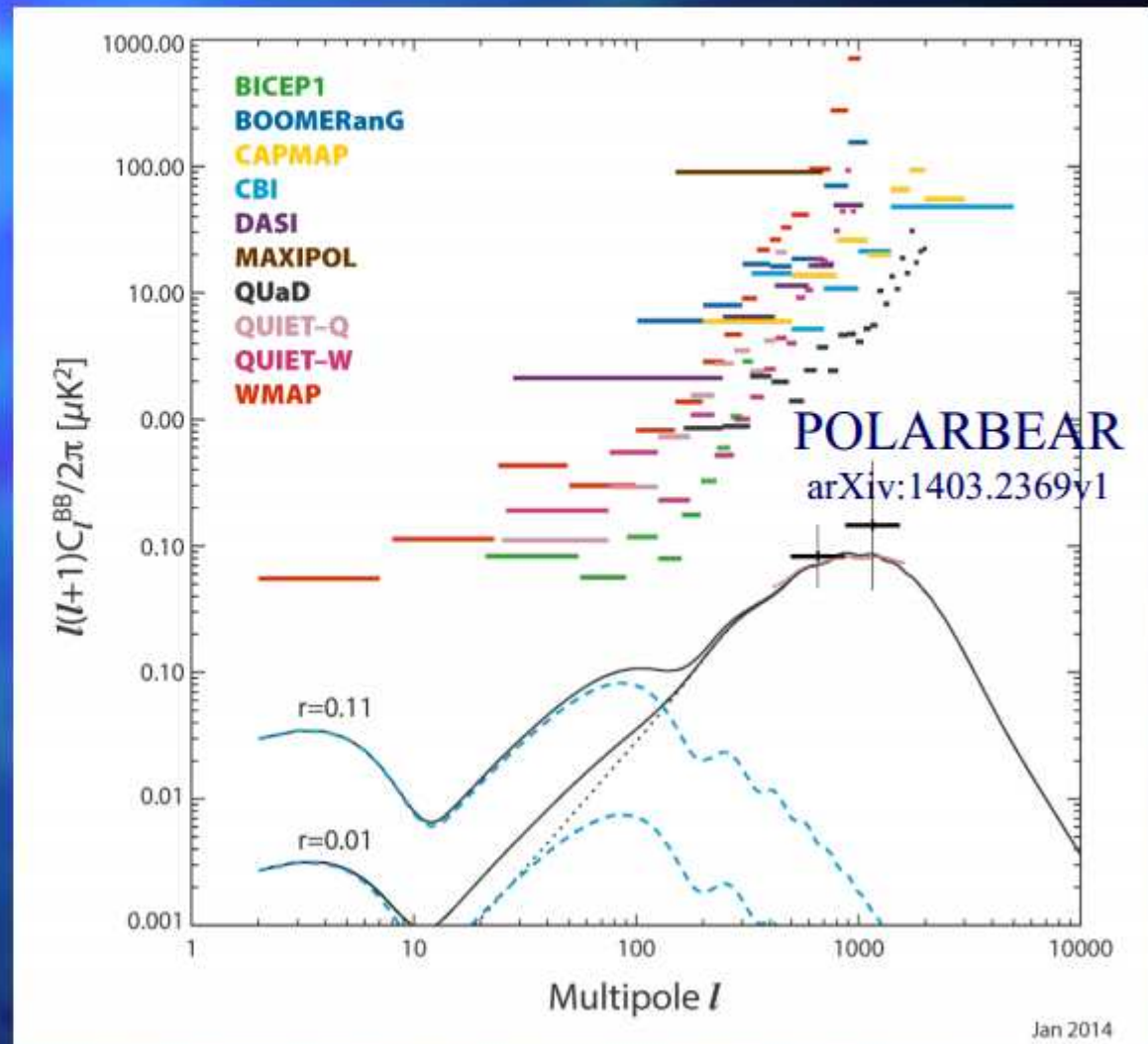
100 GHz ●
150 GHz ●

Spectres de puissance de la polarisation du CMB



Polarisation du CMB: connaissances actuelles

- Modes E mesurés
- Modes B lentillés détectés (Polarbear)
- Modes B Primordiaux: non détectés
 - $r < 0.11$ à 95%
Planck+WP+highL
[Planck 2013 results]
 - L'un des défis de la cosmologie observationnelle





Planck et les modes B

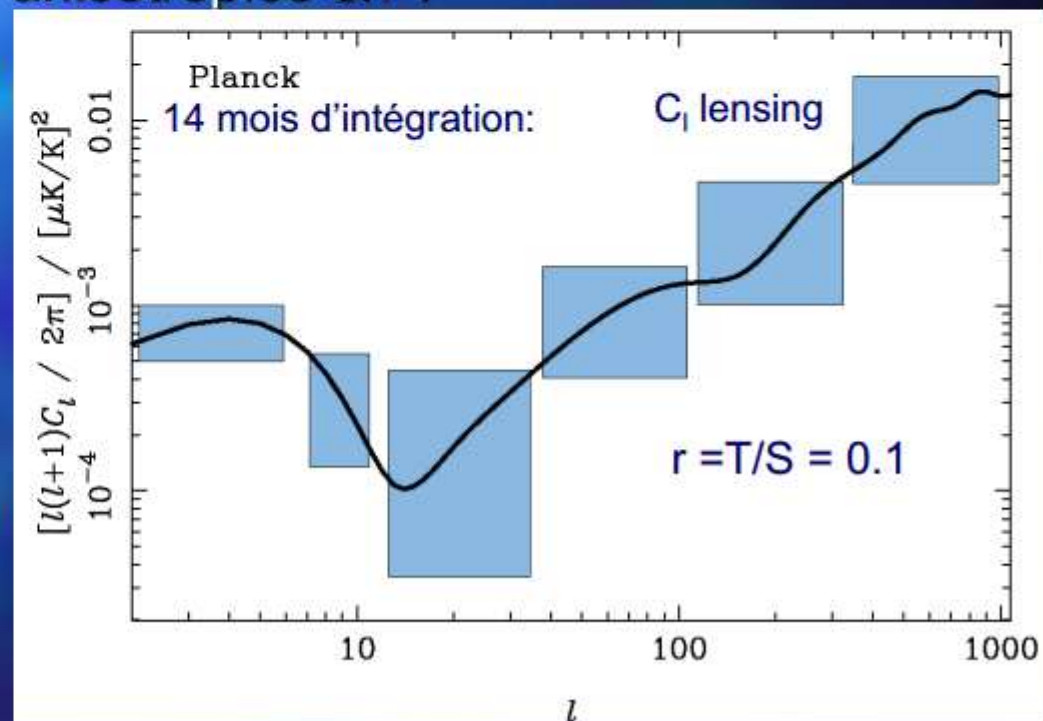
■ Planck

- Conçu pour être limité par la confusion des avant-plans non polarisés
- “expérience ultime” pour les anisotropies en T

■ Sensibilité à la polarisation

- Limitée par le bruit instrumental
- $\sim 60 \mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$ en 1 an
- Modes B: détection envisageable si $r > 0.05$ (Efstathiou et Gratton, 2009)

■ Première contrainte des modes B depuis l'espace



CORE

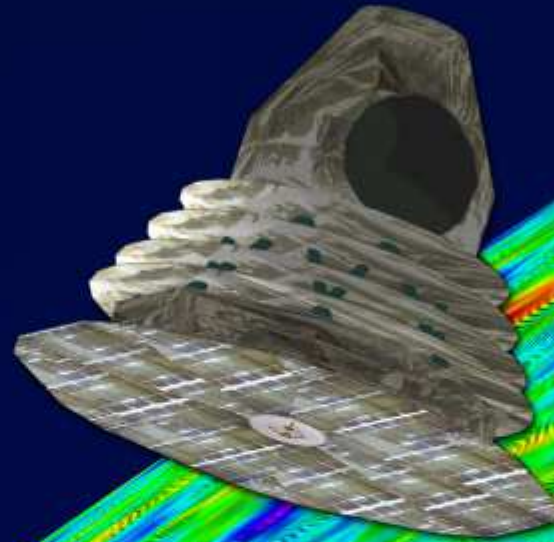
- Une mission dédiée à la mesure précise des anisotropies polarisées du CMB

- Environ 30 fois plus sensible que Planck
- Avec la même résolution angulaire que Planck
- Et un contrôle draconien des effets systématiques

COrE white paper:
arXiv :1102.2181

CORE

Cosmic ORigins Explorer



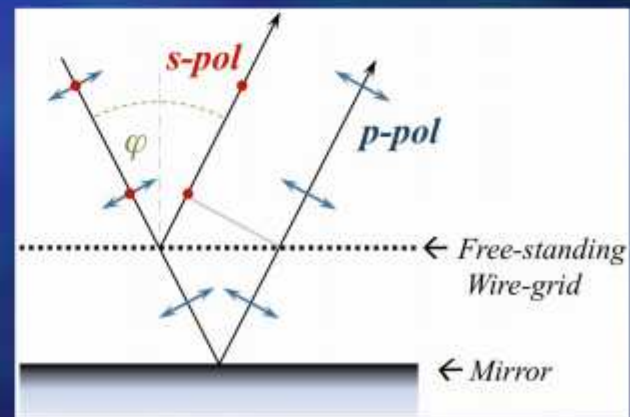
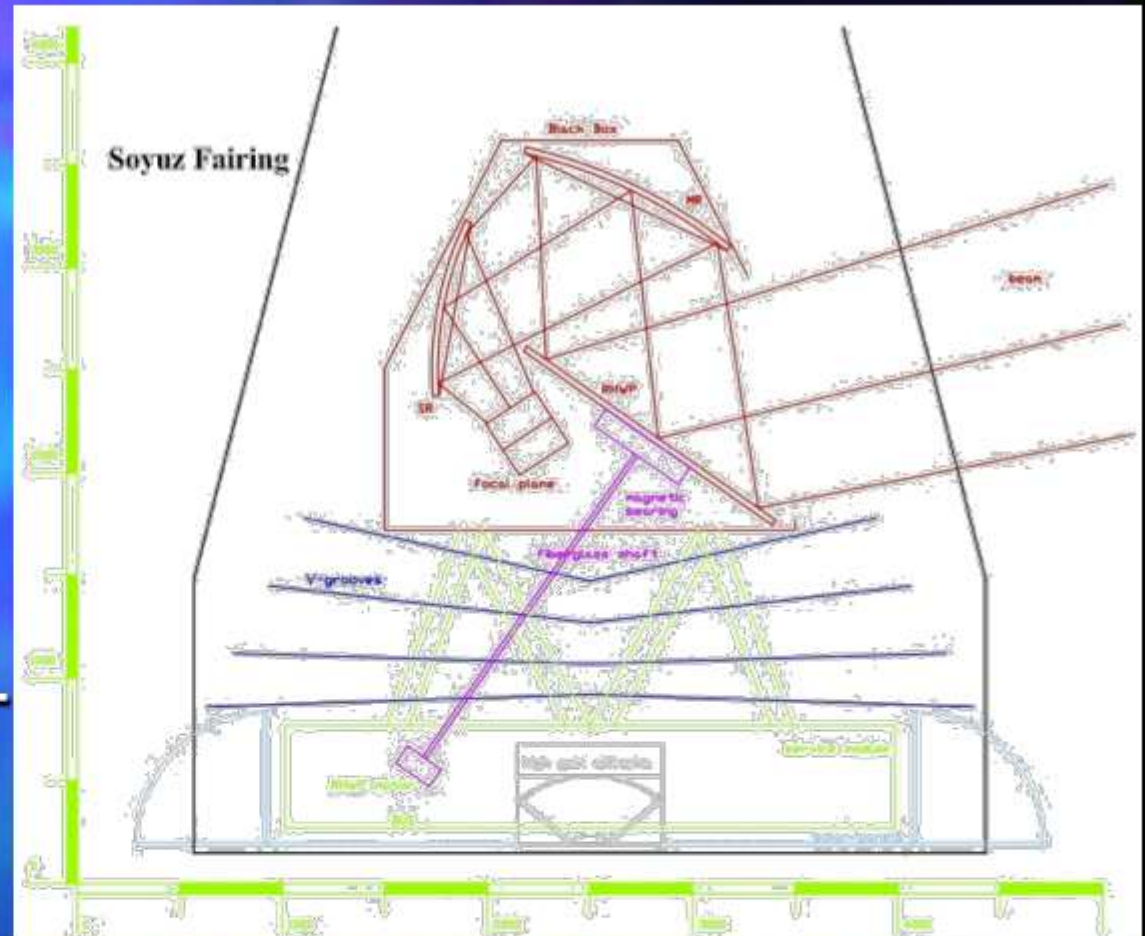
A satellite mission for probing cosmic origins, neutrinos masses and the origin of stars and magnetic fields

through a high sensitivity survey of the microwave polarisation of the entire sky

A proposal in response to the European Space Agency
Cosmic Vision 2015-2025 Call

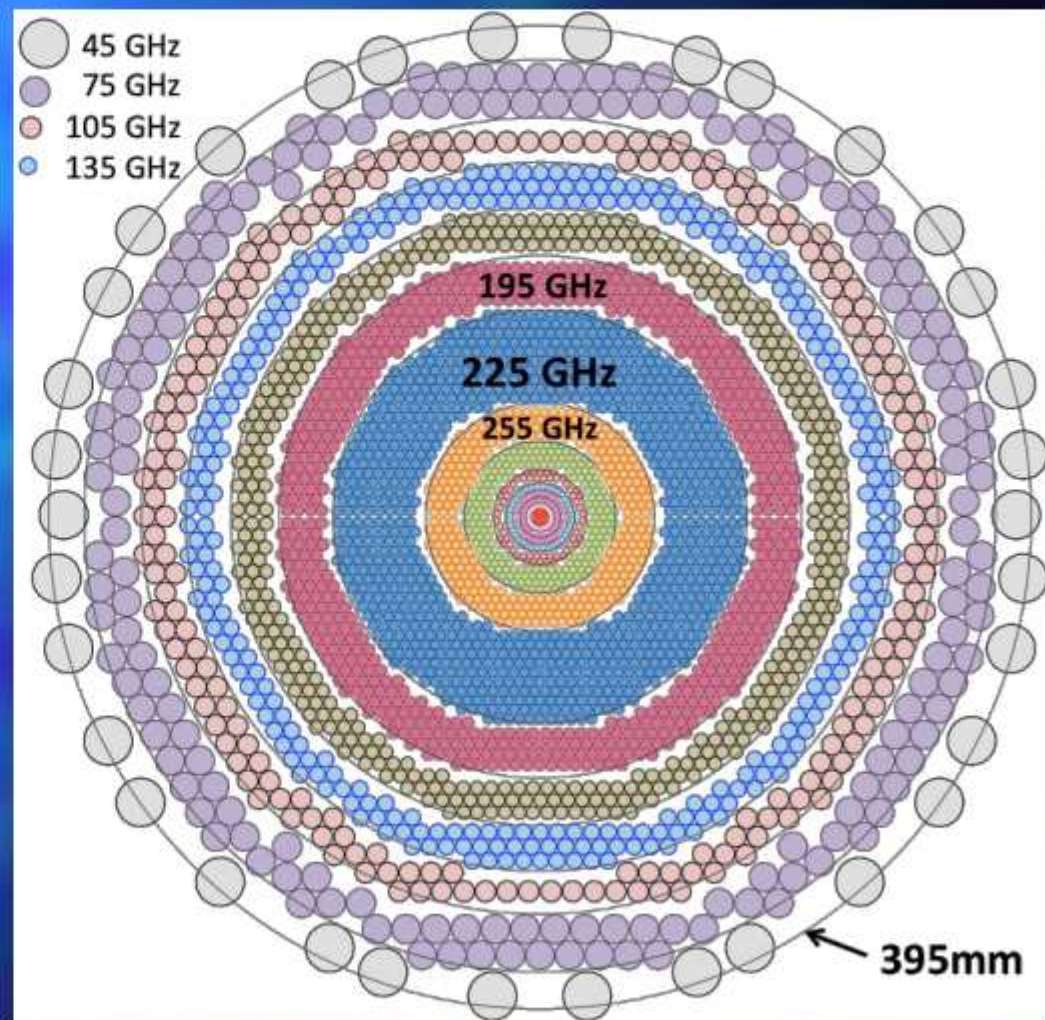
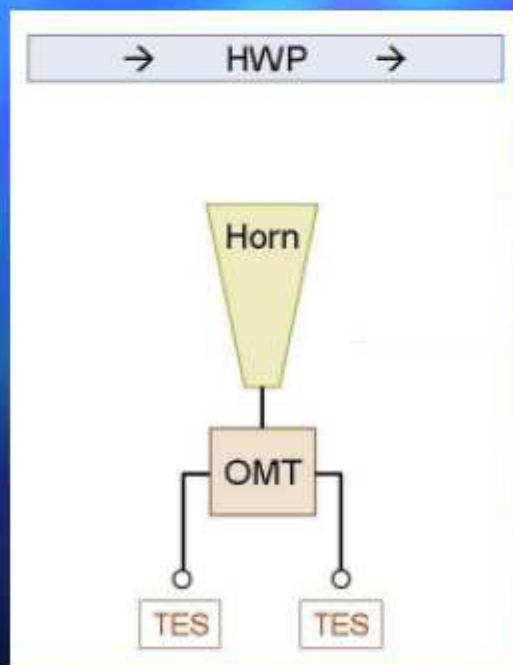
Architecture CORe

- Orbite: L2
 - À la Planck...
- 1er élément optique: lame demi-onde rotative en réflexion
 - Modulation de la polarisation
- Télescope hors-axe
 - Ouverture $\sim 1.2\text{m}$



Plan focal de CORe

- Cornets, OMT, bolomètres supraconducteur



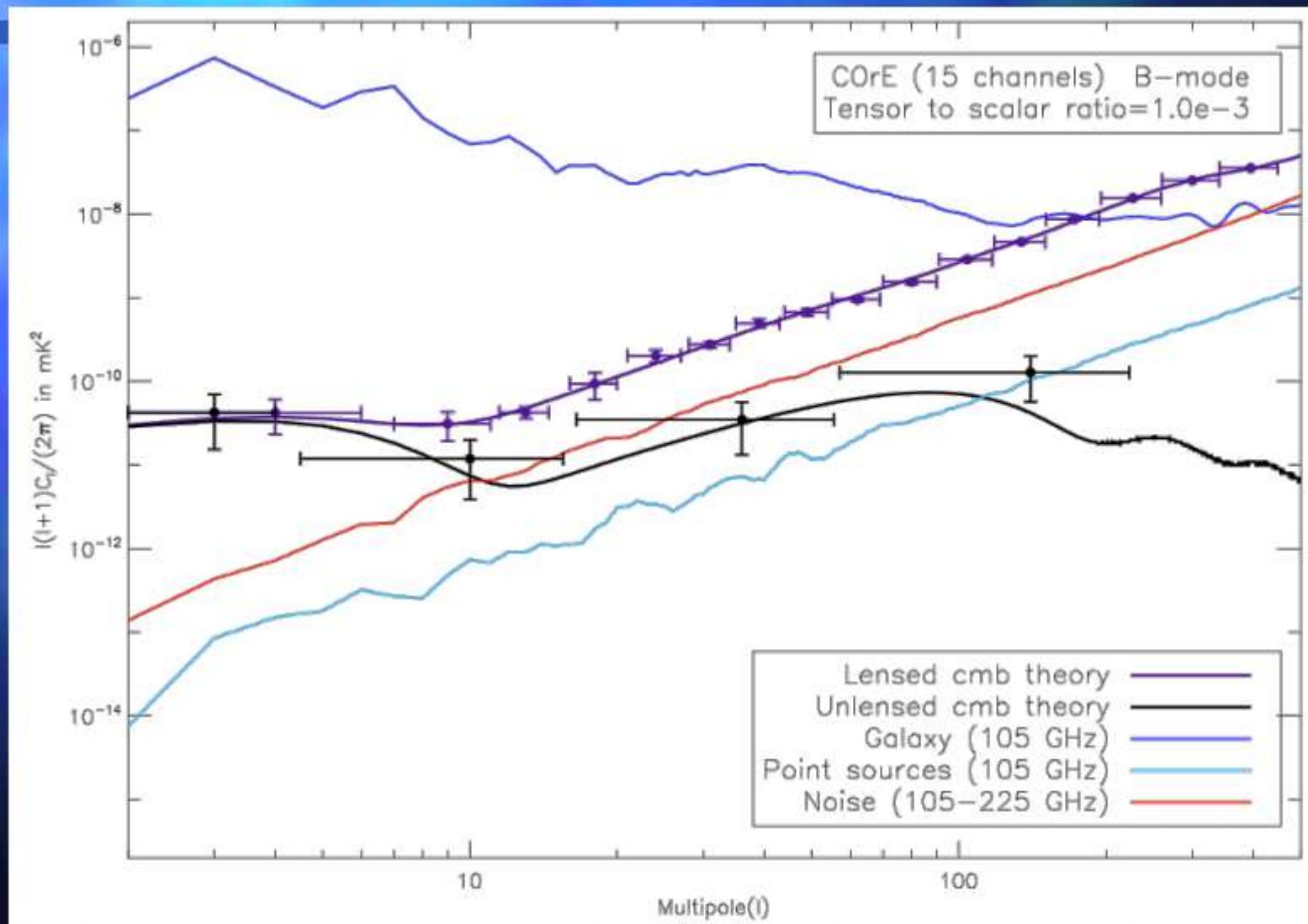
Performances COrE

Table 2: *COrE* performances - assuming a 50% value for detection chain efficiency.

Central Freq. (GHz)	$\Delta\nu$ (GHz)	$N_{detectors}$	FWHM (arcmin)	Unpol. sensitivity ($\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$)	Q & U sensitivity ($\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$)
45	15	64	23.3	5.2	9.0
75	15	300	14	2.7	4.7
105	15	400	10	2.7	4.6
135	15	550	7.8	2.6	4.5
165	15	750	6.4	2.6	4.6
195	15	1150	5.4	2.6	4.5
225	15	1800	4.7	2.6	4.5
255	15	575	4.1	6.0	10.4
285	15	375	3.7	10.0	17
315	15	100	3.3	26.6	46
375	15	64	2.8	67.8	117
435	15	64	2.4	147.6	255
555	195	64	1.9	218	589
675	195	64	1.6	1268	3420
795	195	64	1.3	7744	20881

CMB

COrE: simulation des performances



De Planck à COre

Paramètre	Planck-HFI	COre
λ	300 μ m-3mm	1mm-10mm
$\lambda/\Delta\lambda$	3	3
Résolution angulaire	5'-10'	1'-23'
Détecteurs	Bolo. semicond. 100mK	Bolo. supracond. 100mK
Nombre de détecteurs	4-12 par canal 52 total	64-2000 par canal 6384 total
NEP	1-10.10 ⁻¹⁷ W.Hz ^{-0.5}	2-3.10 ⁻¹⁸ W.Hz ^{-0.5}
Constante de temps	5-8ms	0.5-10ms
Efficacité quantique	>37%	>50%
Architecture de détection	Polarisation Sensitive Bolometers	Lame 1/2 onde + duplexer de polarisation

Planck-HFI



Plan focal COre

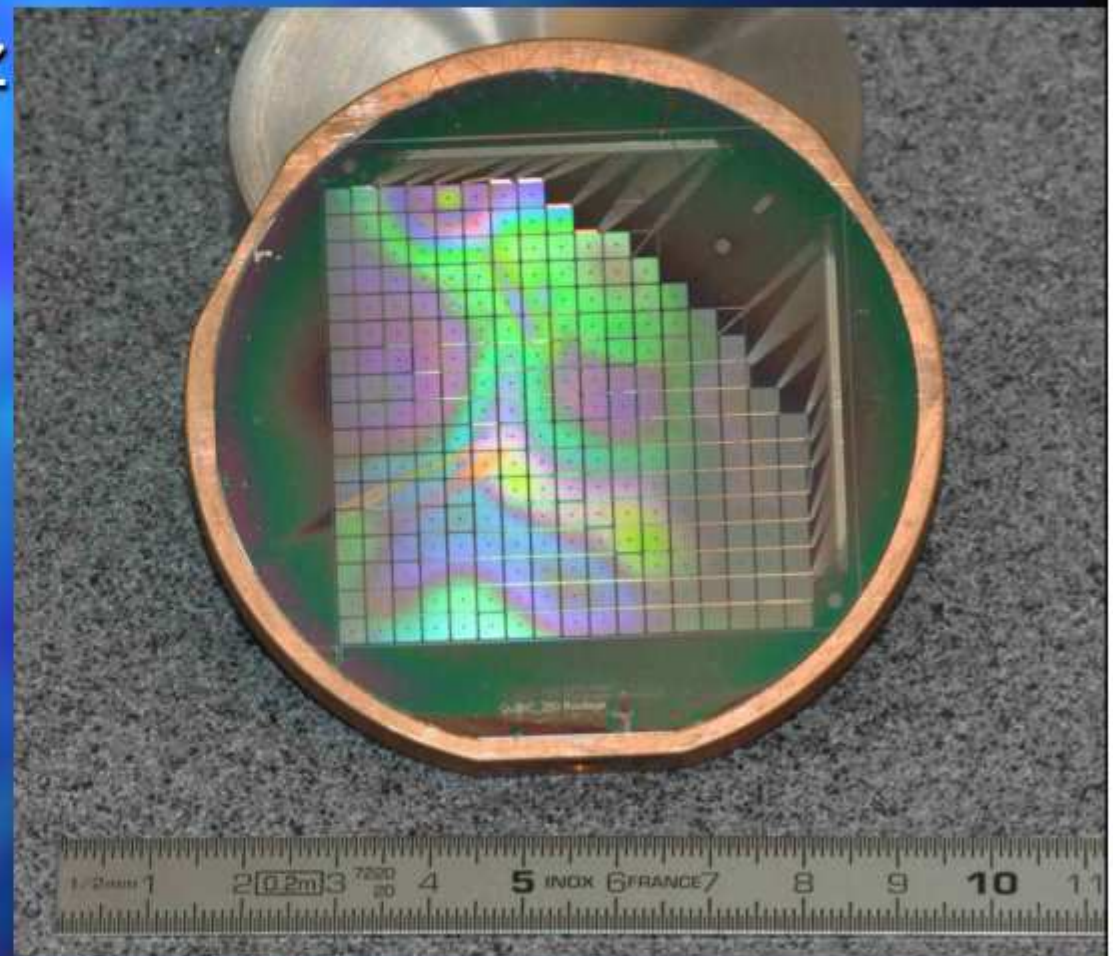
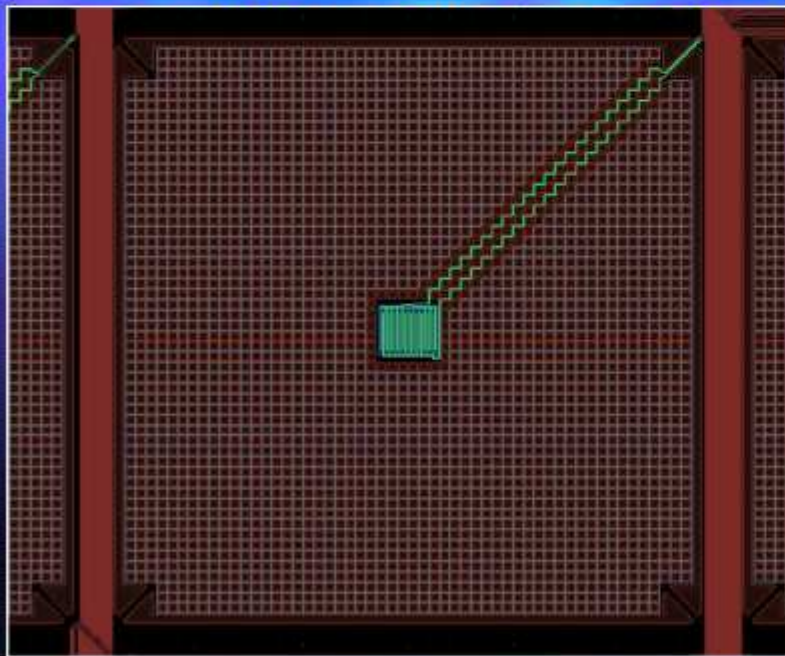
Améliorations instrumentales requises pour atteindre les modes B

- ① **Sensibilité:** $1\mu\text{K}_{\text{CMB}} \rightarrow 0.1\mu\text{K}_{\text{CMB}}$
 - Détection directe
 - Détecteurs supraconducteurs cryogénique ($T < 300\text{mK}$)
 - Bolomètres (TESs)
 - Détecteurs à inductance cinétique (KIDs)
 - Limités par le bruit de photon du CMB
 - **Augmentation du nombre de détecteurs**

Matrice de bolomètres supraconducteurs

R&D BSD (France)

- 256 pixels @ 150GHz
 - Senseur NbSi
 - 3mm*3mm, 100mK



CSNSM, IEF, APC, IRAP

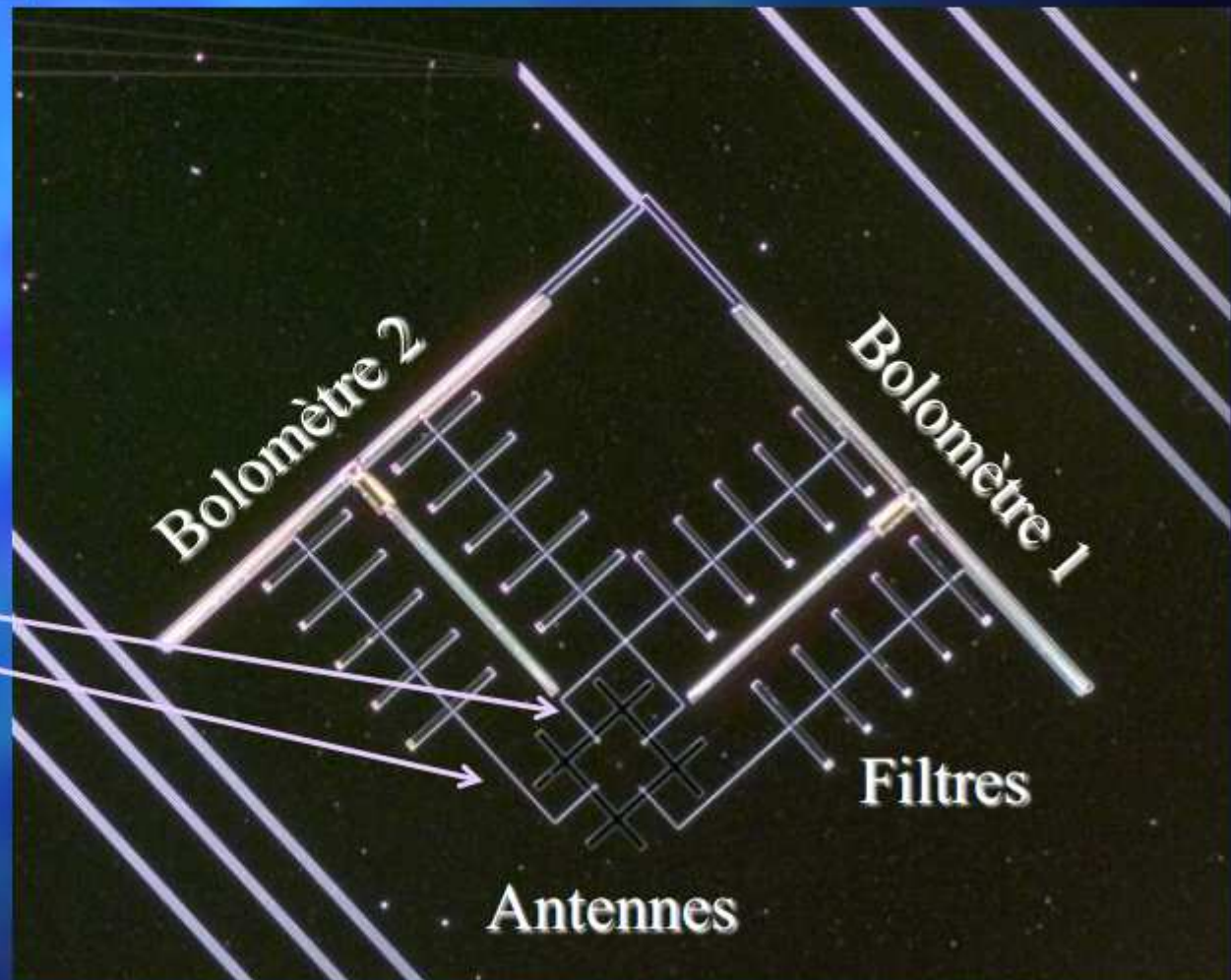
Améliorations instrumentales requises pour atteindre les modes B

② Immunité aux effets parasites instrumentaux

- Architecture classique: mesure différentielle entre 2 polarisations perpendiculaires
 - Effets parasites instrumentaux: différences de gain, de constante de temps, de bande passante, polarisation croisée
- **Mesure intrinsèque de la polarisation**

Radiomètre complet (Polarbear UCB)

Lignes de
transmission
supraconductrices

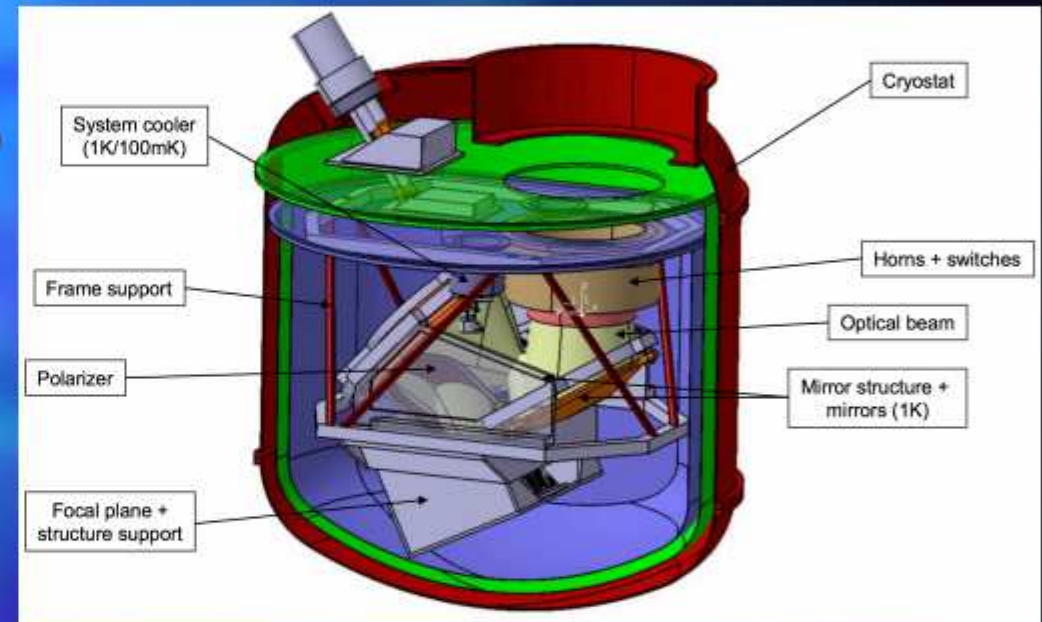


QUBIC

(Q & U Bolometric Interferometer for Cosmology)

■ Objectifs:

- **Interféromètre bolométrique** en Antarctique (Dôme C)
- 4 modules: $r = 0.01$ en 1 an
- Validation des technologies développées en R&D



■ Collaboration internationale:

- France, Grande Bretagne, Irlande, Italie, USA
- 1^{ère} lumière: 2015

Conclusions

- Ere de la cosmologie de précision
 - Paramètres cosmologiques connus au pourcent!
 - Instrumentation millimétrique toujours poussée à la limite
- Prochaine étape: **modes B de polarisation**
 - Caractérisation de l'inflation
 - Véritable défis instrumental

A Suivre!...