

# Les contraintes du fond diffus cosmologique

Twitter/X:  
#neucosmos

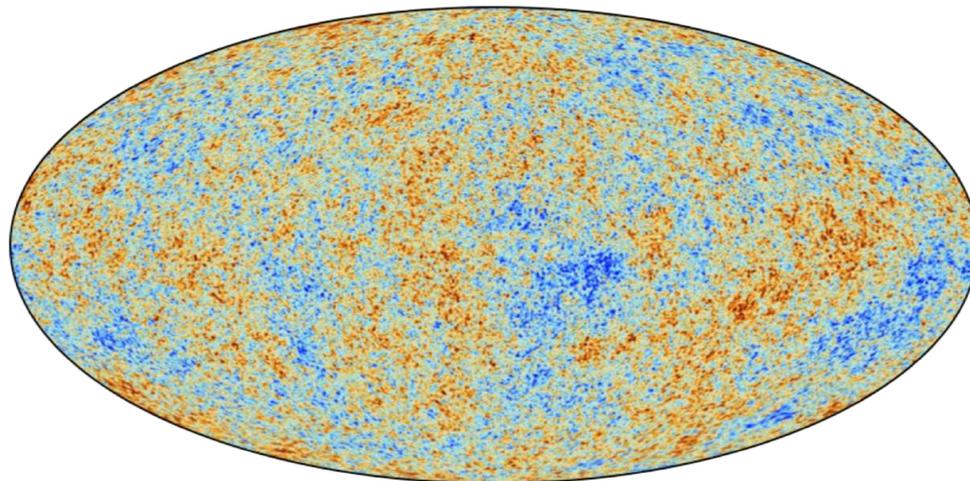
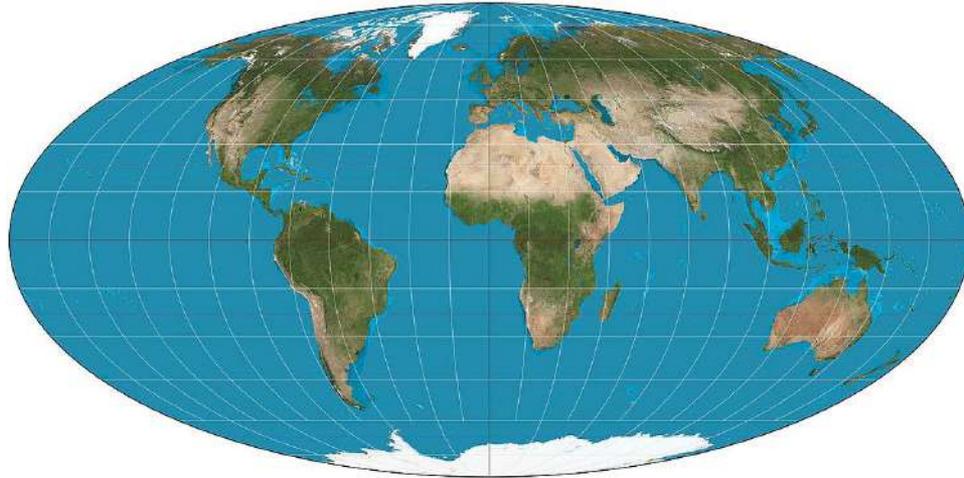
Silvia Galli  
Institut d'Astrophysique de Paris

16/12/2024 Collège de France



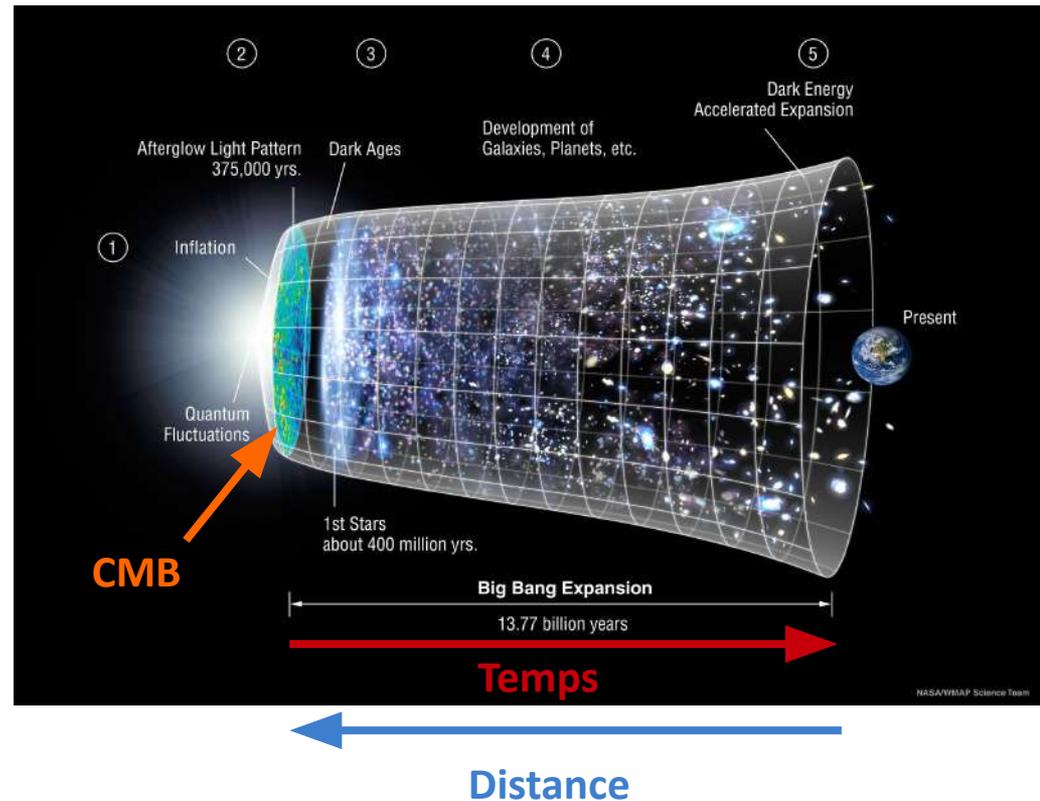
European Research Council  
Established by the European Commission

# Projection



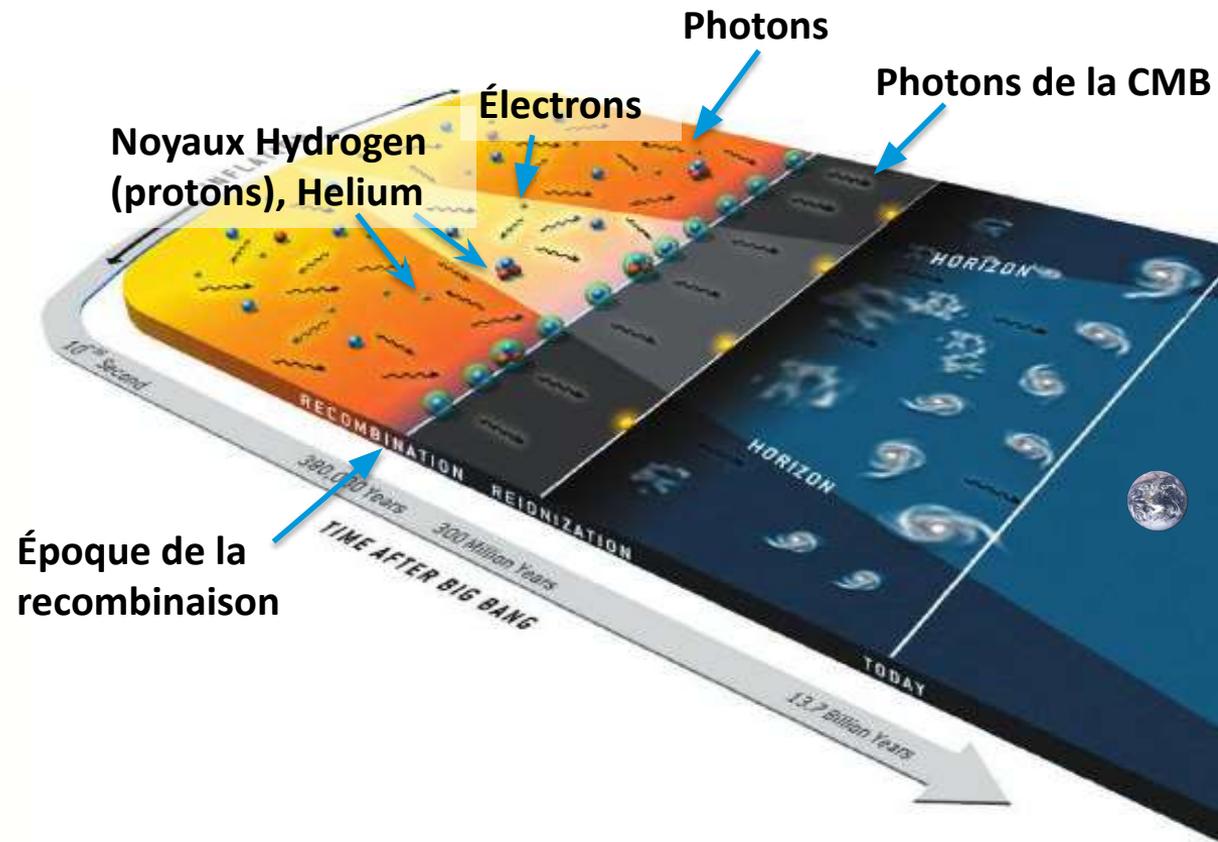
# Le fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background)

- C'est l'image (photons) la plus ancienne de l'univers.
- Elle provient de l'époque de la recombinaison, **380 000 ans** après le Big Bang (il-y-a **~13,8 milliards d'années**).
- La lumière a une vitesse finie. Les photons que nous observons aujourd'hui nous ramènent l'image de leur source telle qu'elle était quand ils ont été émis. Donc plus nous observons loin dans l'espace, plus en regards loin dans le passé, parce ce que les photons qui proviennent de très loin met beaucoup de temps pour arriver à nous.



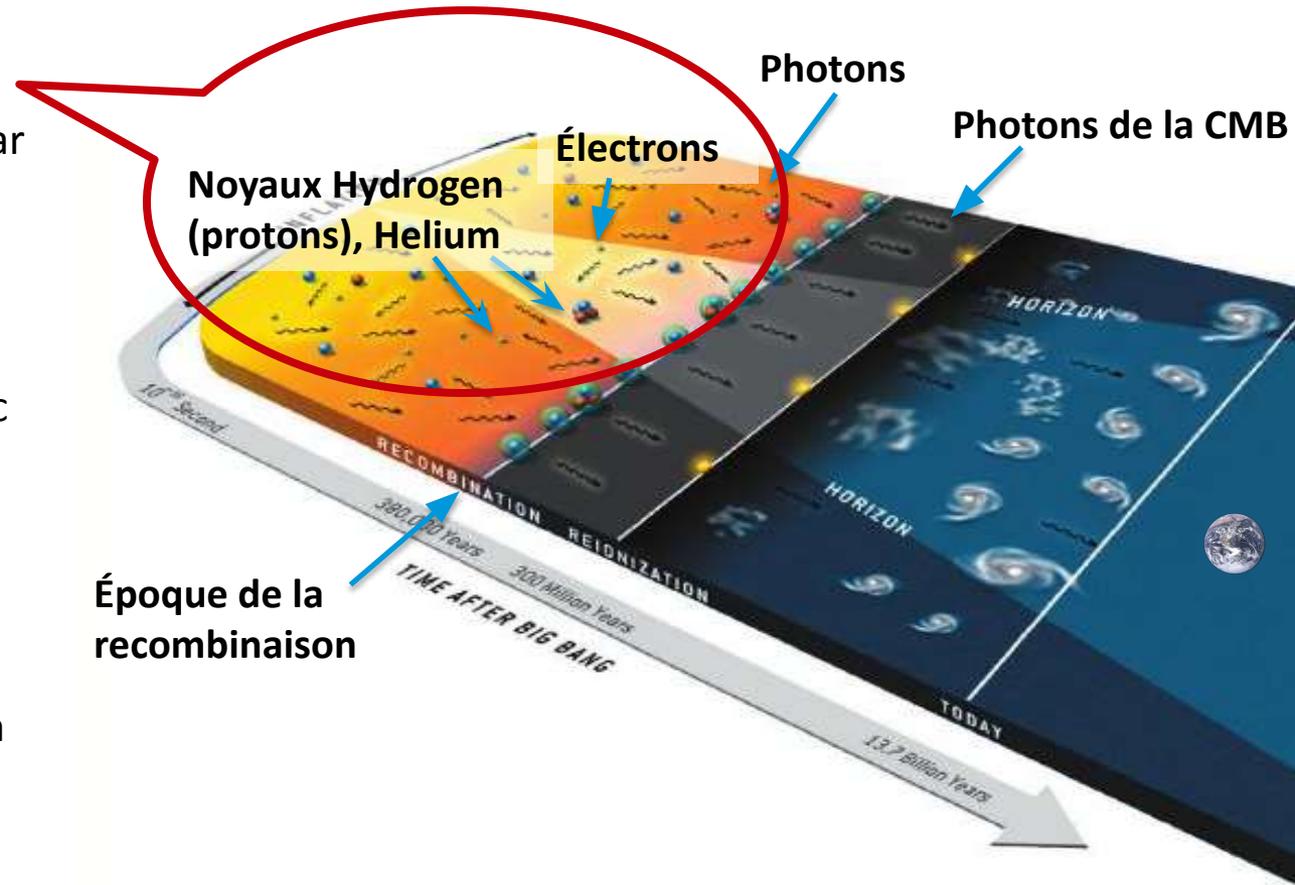
# Le fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background)

- Avant la recombinaison, univers **chaud** (>3000k)
- Matière sous la forme d'un **plasma (noyaux positifs et électrons libres.)**, ionisée par les photons très énergétiques.
- Les électrons libres interagissent beaucoup avec les photons (Thomson scattering), **les photons ne sont pas libres de se propager librement.**
- **L'univers est donc opaque à la lumière:** ce n'est pas possible de recevoir des images qui viennent de loin.



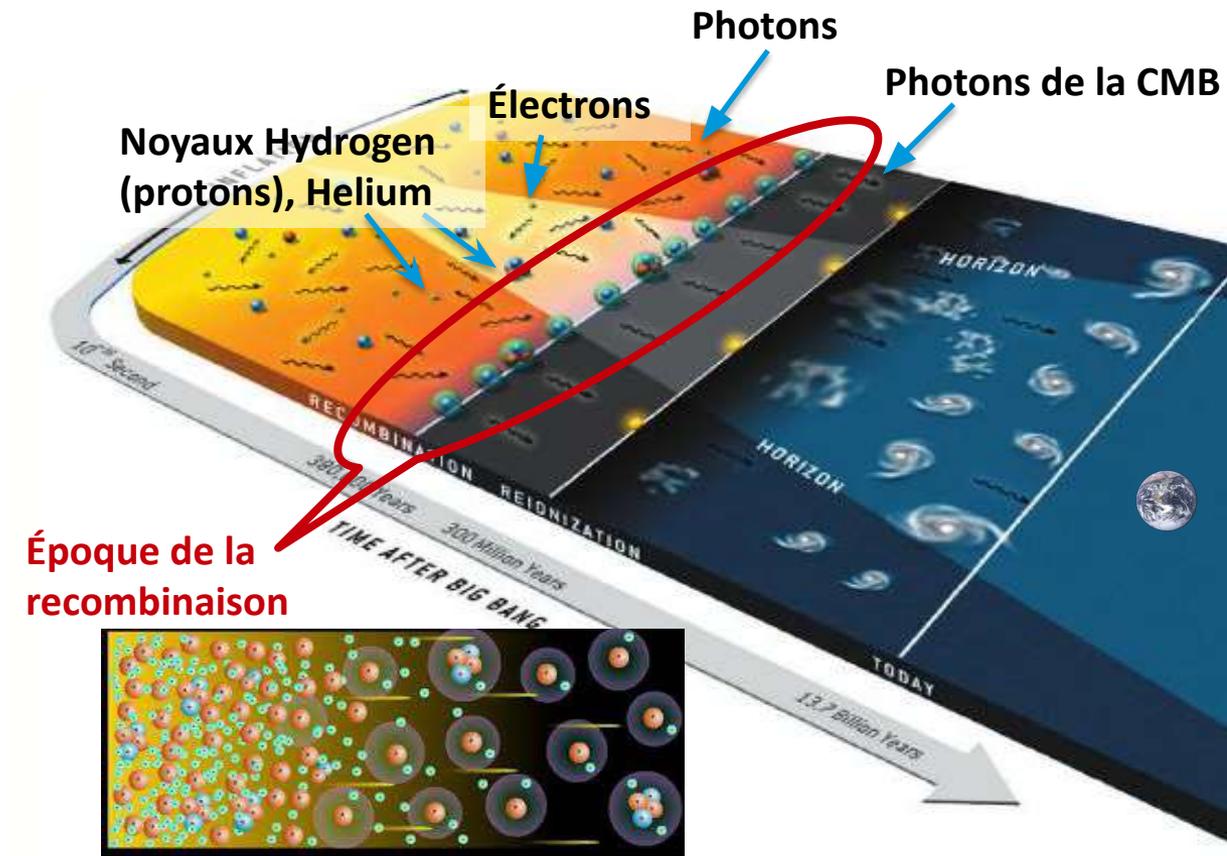
# Le fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background)

- Avant la recombinaison, univers **chaud** (>3000k)
- Matière sous la forme d'un **plasma (noyaux positifs et électrons libres.)**, ionisée par les photons très énergétiques.
- Les électrons libres interagissent beaucoup avec les photons (Thomson scattering), **les photons ne sont pas libres de se propager librement.**
- **L'univers est donc opaque à la lumière:** ce n'est pas possible de recevoir des images qui viennent de loin.



# Le fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background)

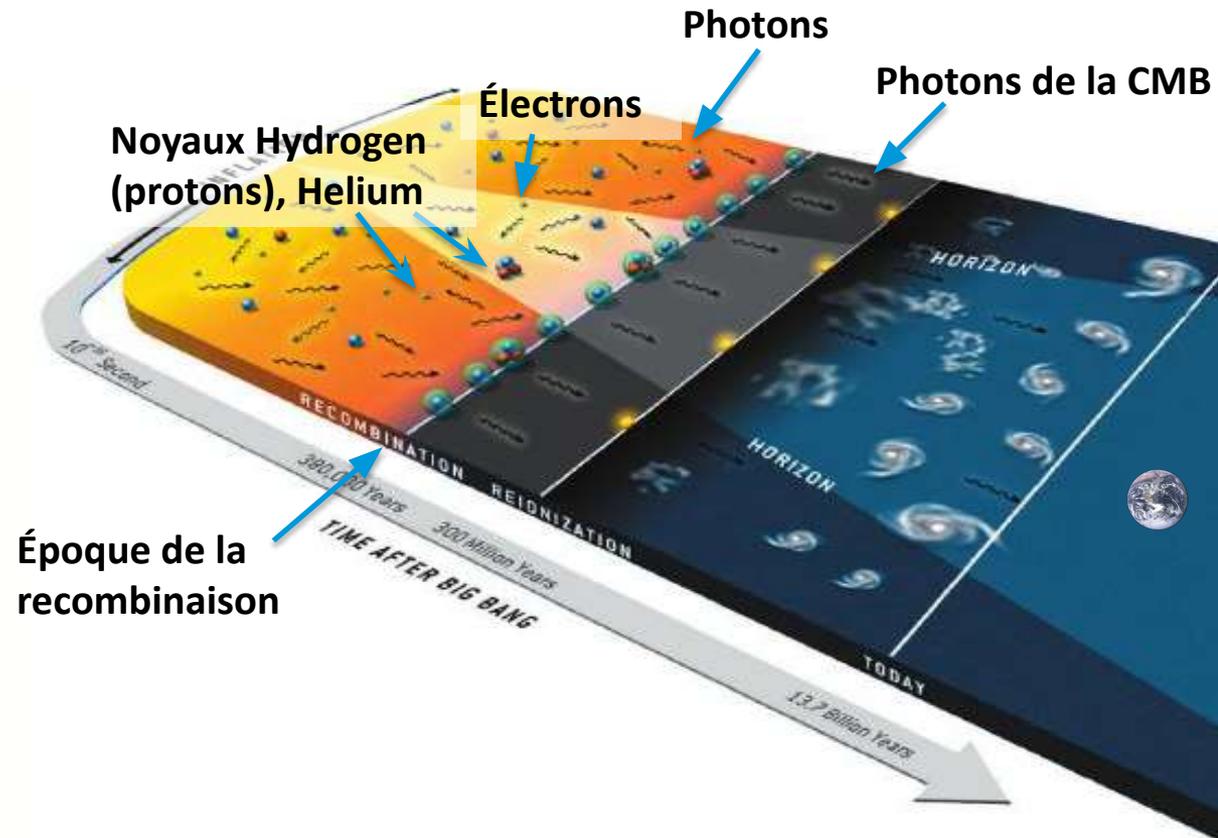
- L'univers se refroidit en conséquence de son expansion. À la **température de 3000K**, il y a moins de photons ionisants. Protons et les électrons se recombinent en Hydrogène neutre. **C'est la recombinaison.**
- Les photons interagissent beaucoup moins avec la matière neutre. Après une dernière interaction avec des électrons libres (**surface de dernière diffusion**), photons se propagent librement sur de longues distances. **L'univers devient alors transparent à la radiation.**
- Les photons que nous recevons depuis cet epoch constitue **le fond diffus cosmologique.**



fu & White (2004), artist B. Christie/SciAm; available at <http://background.uchicago>.

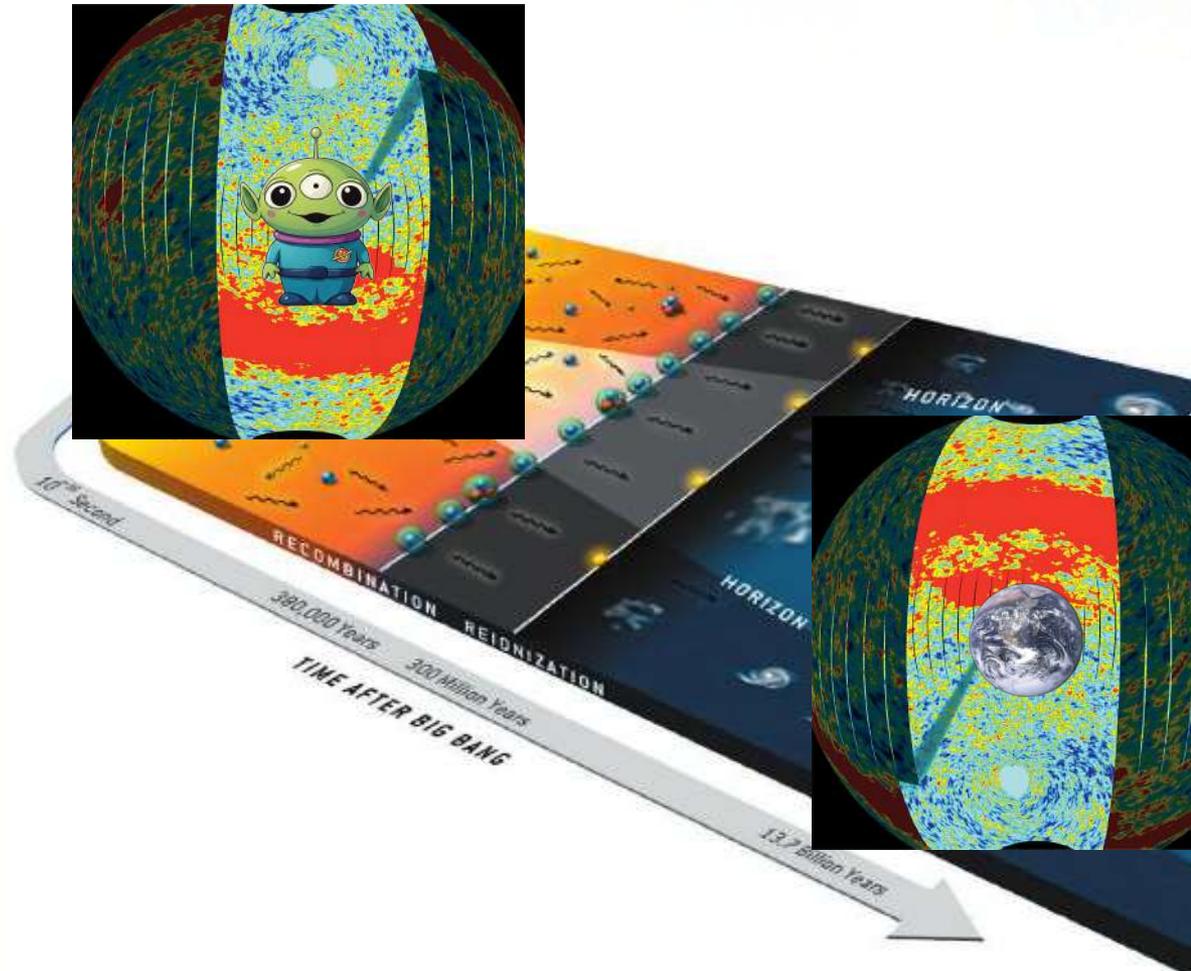
# Le fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background)

- Les photons de la CMB nous ramènent des **informations précieuses sur toute l'histoire de notre univers** : ses origines et conditions initiales, sur la physique du plasma primordial, la physique de la recombinaison.
- Ils nous ramènent aussi des informations sur tout ce qui se passe sur son chemin vers nous : la réionisation de l'univers ainsi que l'effet de lentille gravitationnelle par les grandes structures de l'univers.



# Le fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background)

- La CMB provient d'une distance de **45,7 milliards d'années-lumière** ( $432 \times 10^{21}$  km). Même si le CMB a commencé son voyage vers nous il y a 13,8 milliards d'années, l'univers s'est expandu entre-temps.
- La CMB se forme partout dans l'univers. Un extraterrestre reçoit aujourd'hui les photons du CMB qui ont été émis il y a 45.7 milliard d'années-lumière autour de lui (CMB différent de la notre, mais avec les même caractéristiques statistiques!).
- Il y a **~300 million** de photon du rayonnement du fond diffus par mètre cube!



fu & White (2004), artist B. Christie/SciAm; available at <http://background.uchicago>.

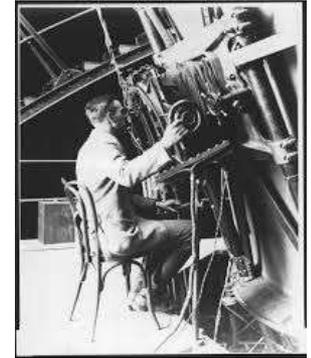
# La découverte de la CMB

# L'expansion de l'univers et le Big Bang chaud

- **1917 Albert Einstein:** La matière courbe l'espace. Besoin d'une constante cosmologique pour maintenir l'univers stable ?
- **1922 Aleksandr Friedman:** L'univers pourrait être en expansion (1)  
Solution aux équations d'Einstein dans un univers en expansion.
- **1927 Georges Lemaître:** L'univers pourrait être en expansion (2).  
L'expansion peut causer le décalage vers le rouge des galaxies (loi de Hubble). Première idée d'un événement de création initial.
- **1929 Edwin Hubble:** L'univers est en expansion ! Mesure du décalage vers le rouge des galaxies et de leur distance avec les céphéides grâce à la méthode développée **en 1912** par **Henrietta Swan Leavitt**.
- **1946-48 George Gamow:** Big Bang chaud. L'univers primitif était chaud, dominé par le rayonnement plutôt que la matière.
- **1948: Ralph Alpher, Hans Bethe et George Gamow:** Nucléosynthèse primordiale
- **1948: Alpher et R. Herman:** Prédiction du CMB (à 5K)
- **1964 Doroshkevich et Novikov:** Détectabilité du CMB comme preuve du Big Bang



Henrietta Swan Leavitt

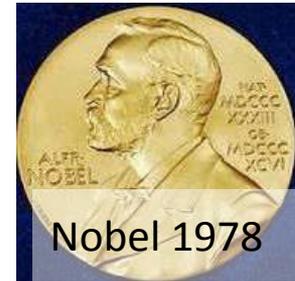
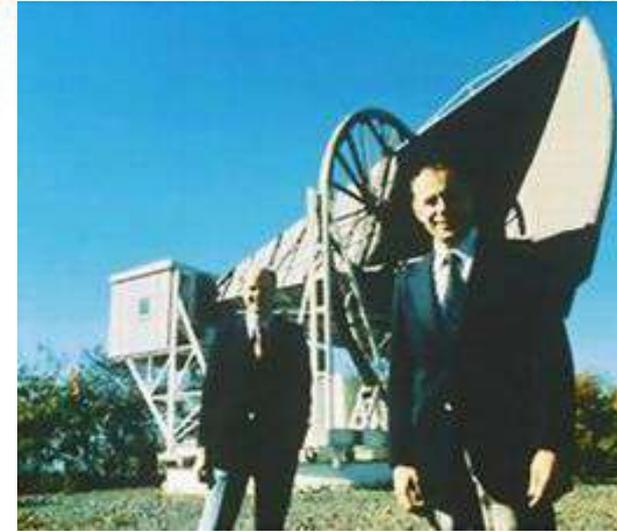


Edwin Hubble

Le terme « Big Bang » a été utilisé pour la première fois par F. Hoyle lors d'une émission de radio de la BBC en 1949.

# Discovery

- **1965 : Arno Penzias et Robert Wilson,** radioastronomes aux Bell Labs à Crawford, New Jersey.
- Radiomètre à cornet micro-ondes d'abord utilisé pour les télécommunications, puis pour l'astronomie.
- Source de bruit uniforme détectée. Ils pensent que c'est dû à des nids d'oiseaux dans le cornet, mais ils confirment qu'il vient du ciel!
- Le groupe de Princeton (Jim Peebles, Robert Dicke, Peter Roll et David Wilkinson) travaillait sur la détection du CMB. Le groupe de Princeton valide la découverte de Penzias et Wilson.



## A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Astrophysical Journal, vol. 142, p.419-421

A. A. PENZIAS  
R. W. WILSON

## COSMIC BLACK-BODY RADIATION\*

Astrophysical Journal, vol. 142, p.414-419

R. H. DICKE  
P. J. E. PEEBLES  
P. G. ROLL  
D. T. WILKINSON

# La température moyenne de la CMB (Le monopole)

- Le CMB a un spectre de corps noir avec une température moyenne de  $T = 2,725 \pm 0,002$  K (COBE, Mather et al.).
- Un spectre de corps noir est une distribution d'énergie des photons (rayonnement électromagnétique) émis par un corps noir, qui est un objet idéal absorbant tout rayonnement électromagnétique incident. Ce spectre est caractérisé par un seul paramètre, sa température, et a une forme caractéristique définie par la loi de Planck.

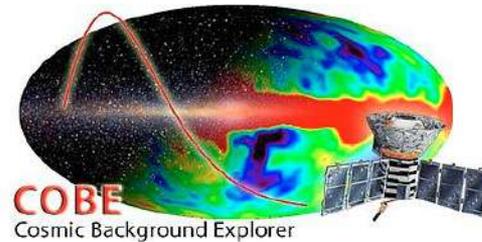


COBE

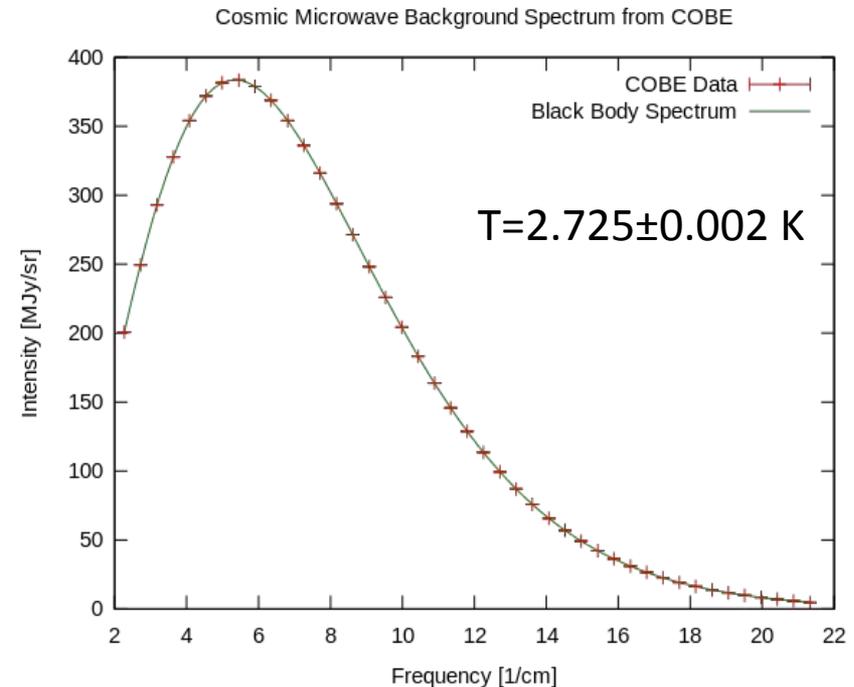
$T = 2.728$  K

# La température moyenne de la CMB par COBE

- Lancement du satellite COBE en 1989.
- Trois instruments à bord :
  - FIRAS : pour mesurer le spectre du corps noir du CMB [60-2880 GHz]
  - DMR : pour mesurer les anisotropies de température du CMB [31,5, 53, 90 GHz]
  - DIRBE : pour mesurer le fond diffus cosmologique infrarouge
- Mesures FIRAS : Mather et al. (1994, 1996), Fixsen 1996
- Pic du corps noir à  $\sim 160$  GHz, dans les microondes.
- **Même si la température de la CMB était de  $\sim 3000\text{K}$  à son émission, l'expansion de l'univers a dilué son énergie et nous la observons aujourd'hui à  $\sim 2.7\text{K}$ .**

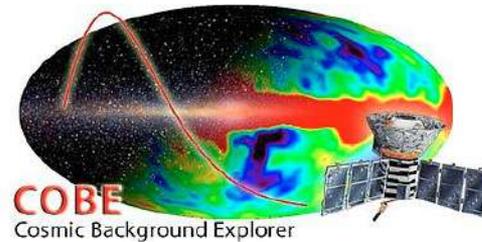


Nobel 2006

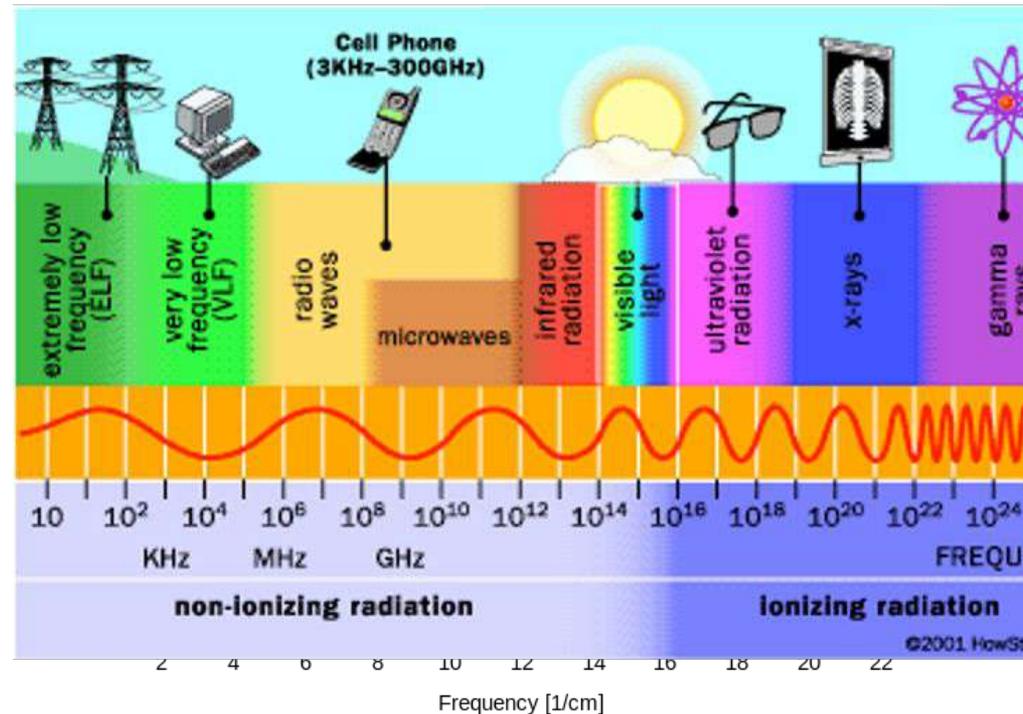


# La température moyenne de la CMB par COBE

- Lancement du satellite COBE en 1989.
- Trois instruments à bord :
  - FIRAS : pour mesurer le spectre du corps noir du CMB [60-2880 GHz]
  - DMR : pour mesurer les anisotropies de température du CMB [31,5, 53, 90 GHz]
  - DIRBE : pour mesurer le fond diffus cosmologique infrarouge
- Mesures FIRAS : Mather et al. (1994, 1996), Fixsen 1996
- Pic du corps noir à  $\sim 160$  GHz, dans les microondes.
- **Même si la température de la CMB était de  $\sim 3000\text{K}$  à son émission, l'expansion de l'univers a dilué son énergie et nous la observons aujourd'hui à  $\sim 2.7\text{K}$ .**



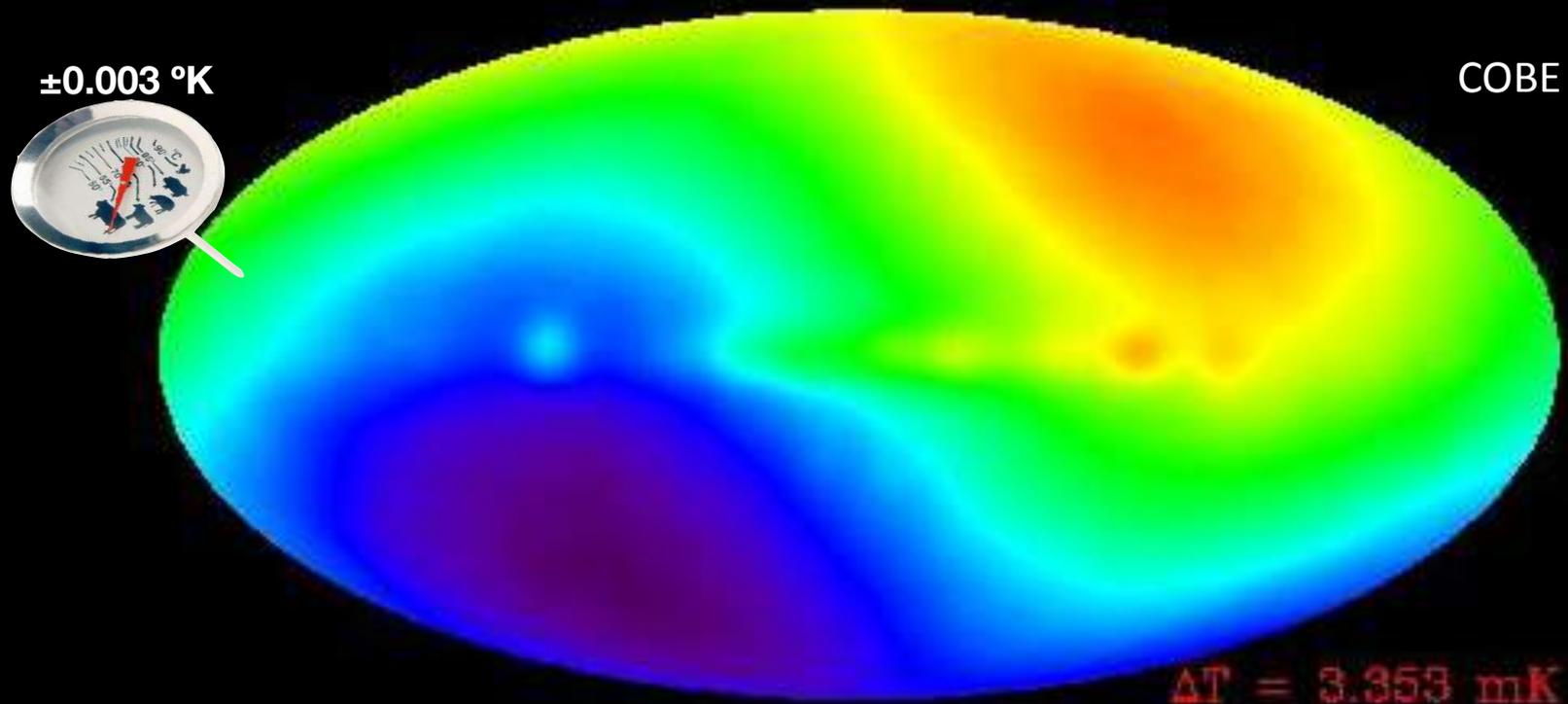
Nobel 2006



# Le dipole

- Le système solaire bouge par rapport à la CMB à une vitesse de 370 km/s. Ce mouvement produit un dipôle de  $\Delta T = 3,3645 \pm 0,002$  mK (Planck 2015) par effet doppler.
- L'effet Doppler, bien connu pour les ondes sonores (la sirène d'une ambulance qui change de tonalité en s'approchant puis en s'éloignant), s'applique aussi à la lumière. Il décrit le changement de fréquence (et donc de couleur) de la lumière émise par une source en mouvement par rapport à un observateur.

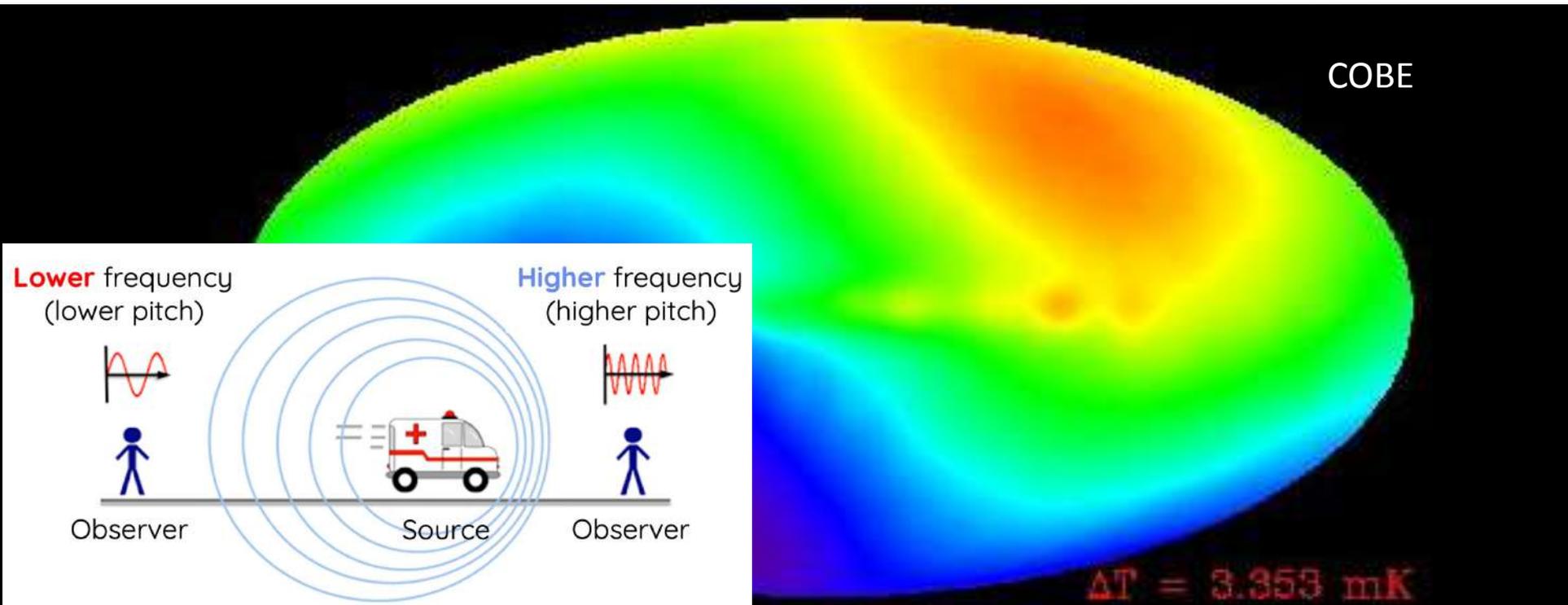
**On retire la partie constante de l'image.**



# Le dipôle

- Le système solaire bouge par rapport à la CMB à une vitesse de 370 km/s. Ce mouvement produit un dipôle de  $\Delta T = 3,3645 \pm 0,002$  mK (Planck 2015) par effet doppler.
- L'effet Doppler, bien connu pour les ondes sonores (la sirène d'une ambulance qui change de tonalité en s'approchant puis en s'éloignant), s'applique aussi à la lumière. Il décrit le changement de fréquence (et donc de couleur) de la lumière émise par une source en mouvement par rapport à un observateur.

**On retire la partie constante de l'image.**

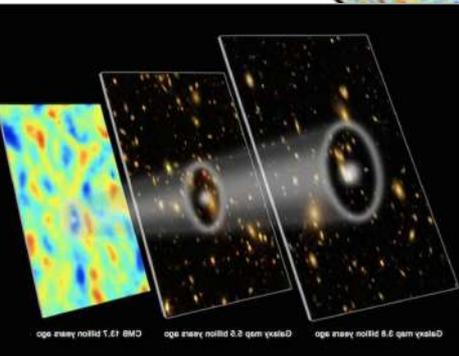
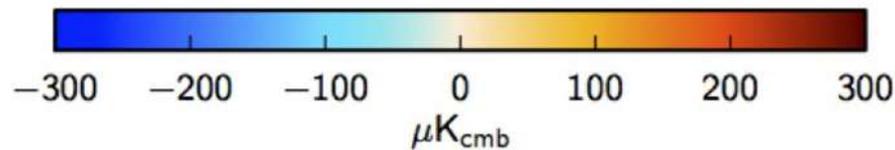
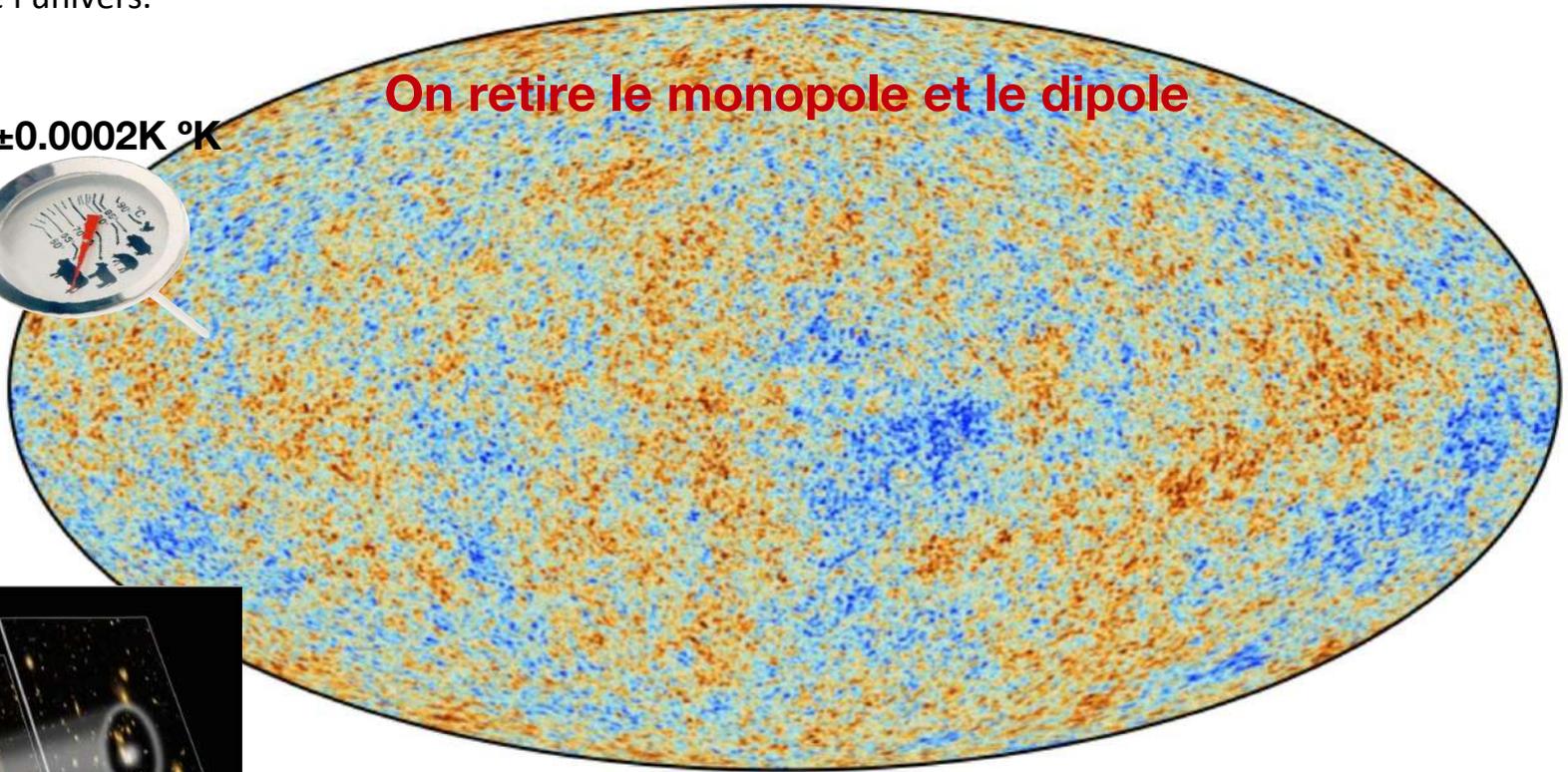


# Les anisotropies de température

Au niveau du  $\mu\text{K}$ , de toutes petites anisotropies de température. C'est la signature des inhomogénéités primordiales ! Les inhomogénéités primordiales de densité de la matière noire, de la matière ordinaire comme les électrons et protons, et des photons dans le plasma primordial sont générés dans les premiers instants de vie de l'univers (inflation) et évoluent dans le temps sous l'effet de la gravité et de l'interactions entre les différentes particules. **Ses inhomogénéités forment les points chauds et froids du rayonnement fossile. Ils évoluent ensuite** par attraction gravitationnelle pour donner les grandes structures de l'univers.

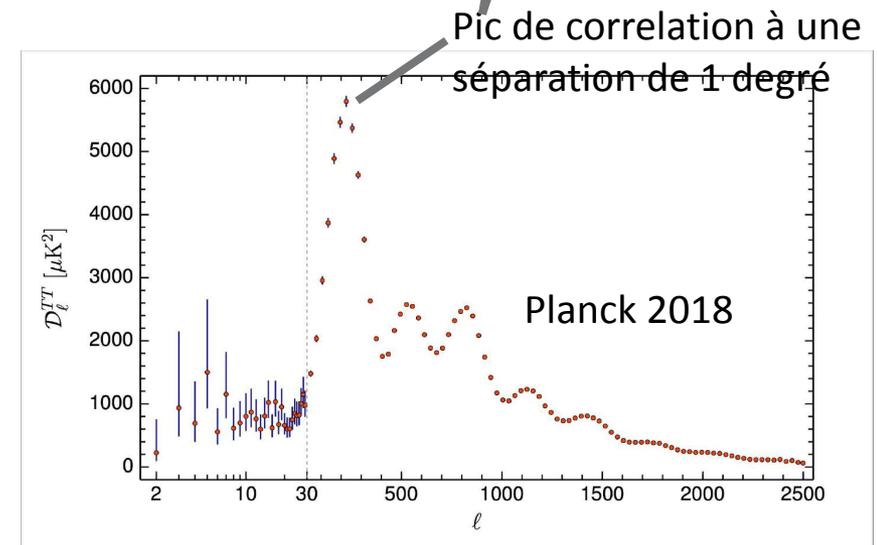
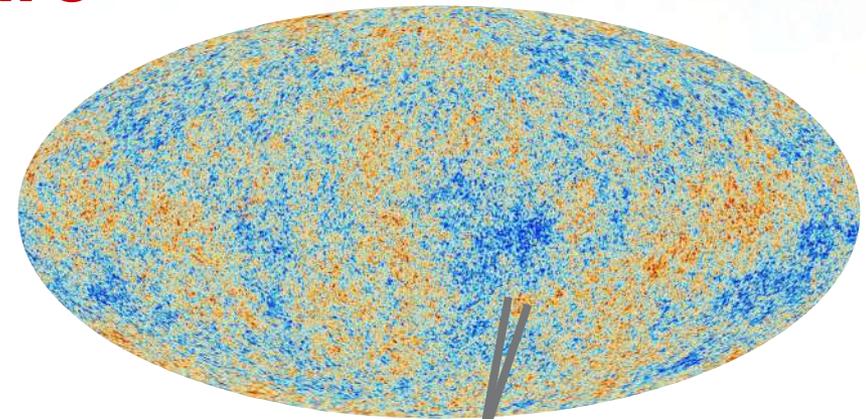
On retire le monopole et le dipole

$\pm 0.0002\text{K } \mu\text{K}$



# Le spectre de puissance mesuré des anisotropies de température

- Comment décrire et modéliser les anisotropies du rayonnement de fond cosmologique ?
- La distribution des anisotropies est proche d'une distribution gaussienne avec corrélation spatiales.
- Une distribution gaussienne est caractérisé par sa moyenne et sa variance (amplitude des contraste de température).
- La transformée de Fourier de celui-ci : le spectre de puissance
- Le spectre de puissance nous indique l'amplitude des fluctuations de température du CMB en fonction de leur taille angulaire sur le ciel.
- **Le spectre de puissance contient presque l'intégralité de l'information cosmologique!**



Grandes échelles  
angulaire

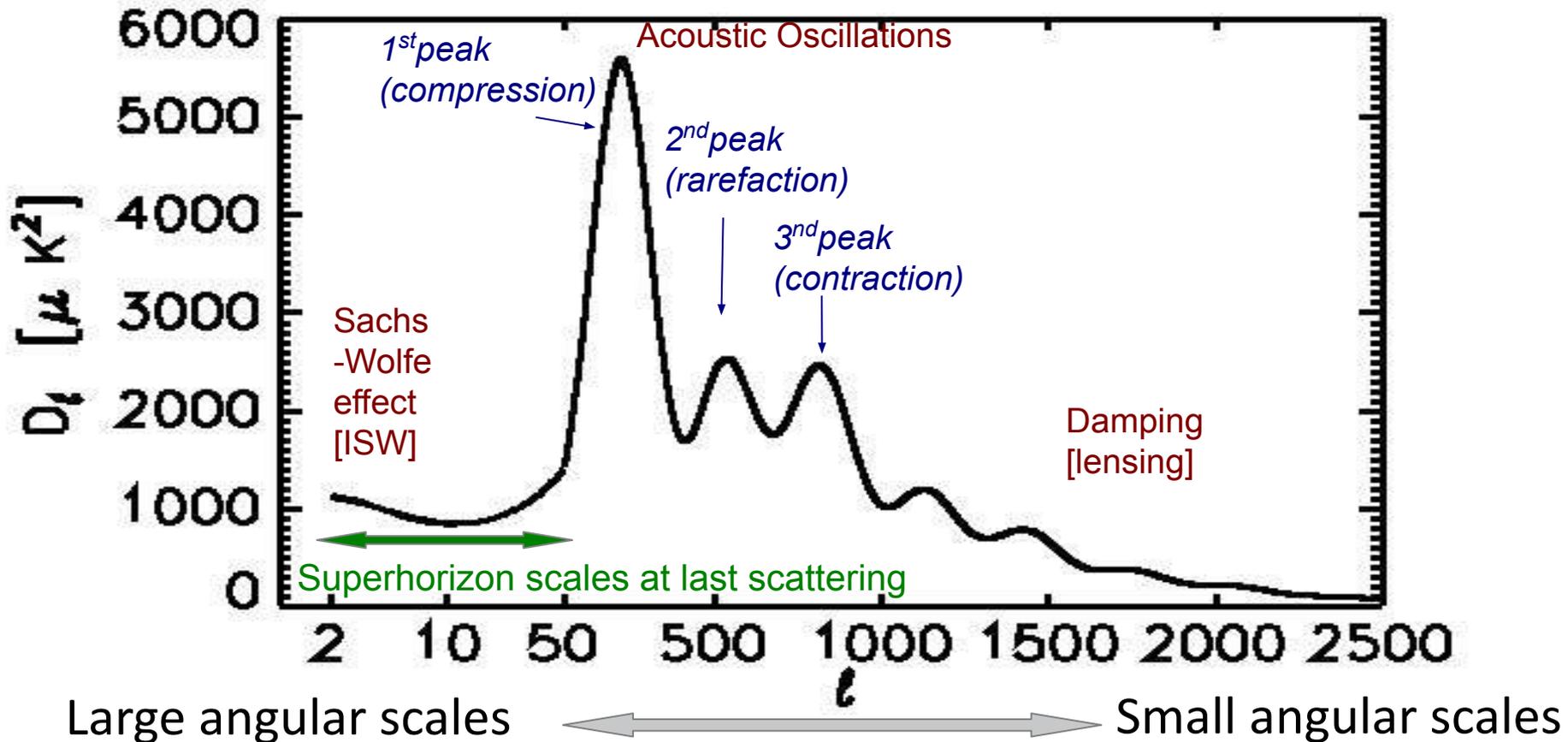
Petites échelles  
angulaires

# La prédiction théorique: le modèle $\Lambda$ CDM

- Nous pouvons construire un modèle de l'Univers basé sur la **relativité générale** et le **modèle standard des particules** (théorie quantique des champs).
- Dans ce modèle, l'Univers est **homogène** (invariant par translation spatiale) et **isotrope** (invariant par rotation) et **plat**.
- Les conditions initiales sont fixées par **l'inflation (accélération superluminal au début de l'univers)**.
- Il contient de la **matière noire froide** (CDM), de **l'énergie sombre** (constante cosmologique  $\Lambda$ ), des baryons (c'est-à-dire de la **matière ordinaire**) et du rayonnement (**photons + 3 neutrinos**).
- Ce modèle est contrôlé par quelques **paramètres cosmologique**, tels que la densité d'énergie des différentes composantes, l'amplitude et la pente du spectre de puissance des perturbations de densité primordiales, etc.

# Le spectre de puissance

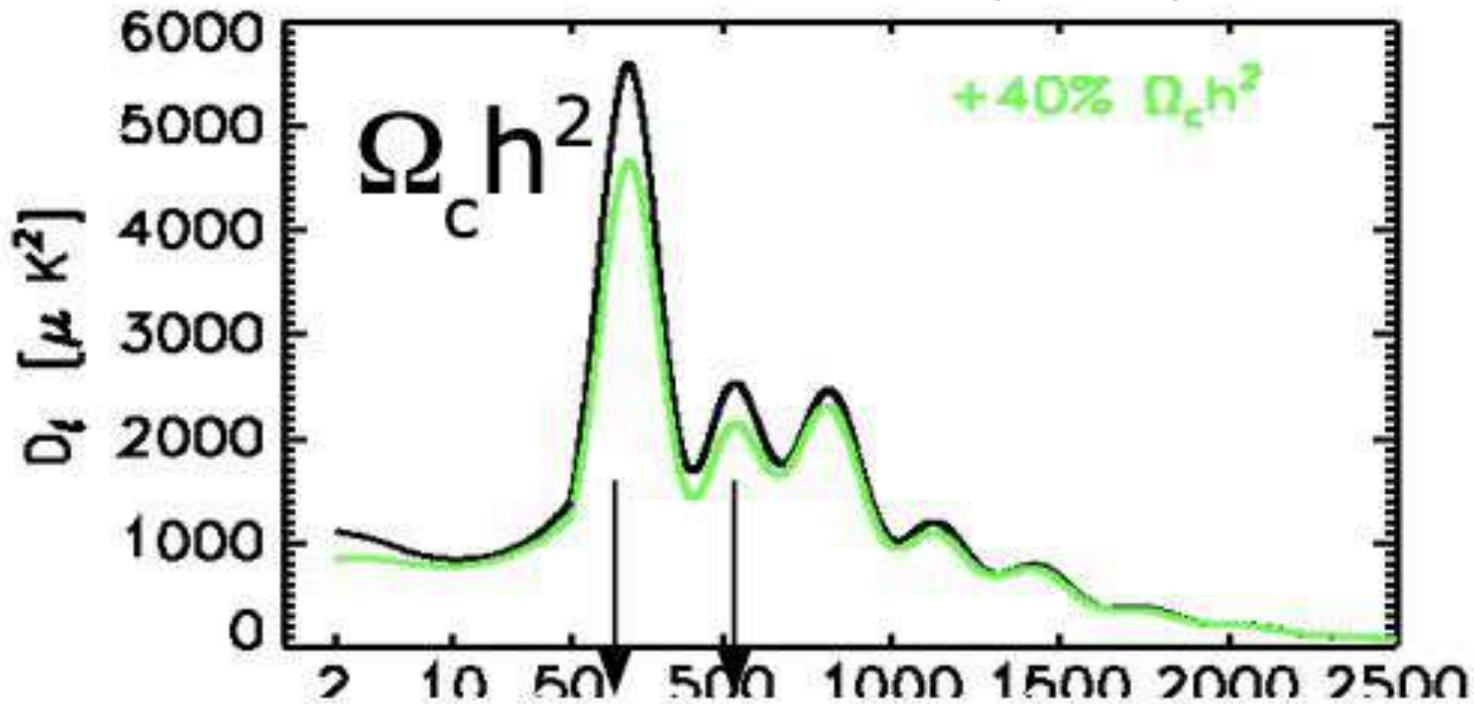
Le spectre de puissance du fond diffus cosmologique (CMB) dépend de nombreux mécanismes physiques, notamment des oscillations acoustiques du plasma primordial qui se contracte sous l'effet de la gravité et se dilate sous l'effet du rayonnement. Ces effets dépendent de paramètres cosmologiques tels que la densité de matière noire, de matière ordinaire, le taux d'expansion de l'Univers, la nature de la gravité, la nature des interactions, etc. Ceci nous permet de mesurer les paramètres cosmologiques qui gouvernent ces effets.



# Le spectre de puissance

Le spectre de puissance du fond diffus cosmologique (CMB) dépend de nombreux mécanismes physiques, notamment des oscillations acoustiques du plasma primordial qui se contracte sous l'effet de la gravité et se dilate sous l'effet du rayonnement. Ces effets dépendent de paramètres cosmologiques tels que la densité de matière noire, de matière ordinaire, le taux d'expansion de l'Univers, la nature de la gravité, la nature des interactions, etc. Ceci nous permet de mesurer les paramètres cosmologiques qui gouvernent ces effets.

Effet de la densité de matière noire sur le spectre de puissance

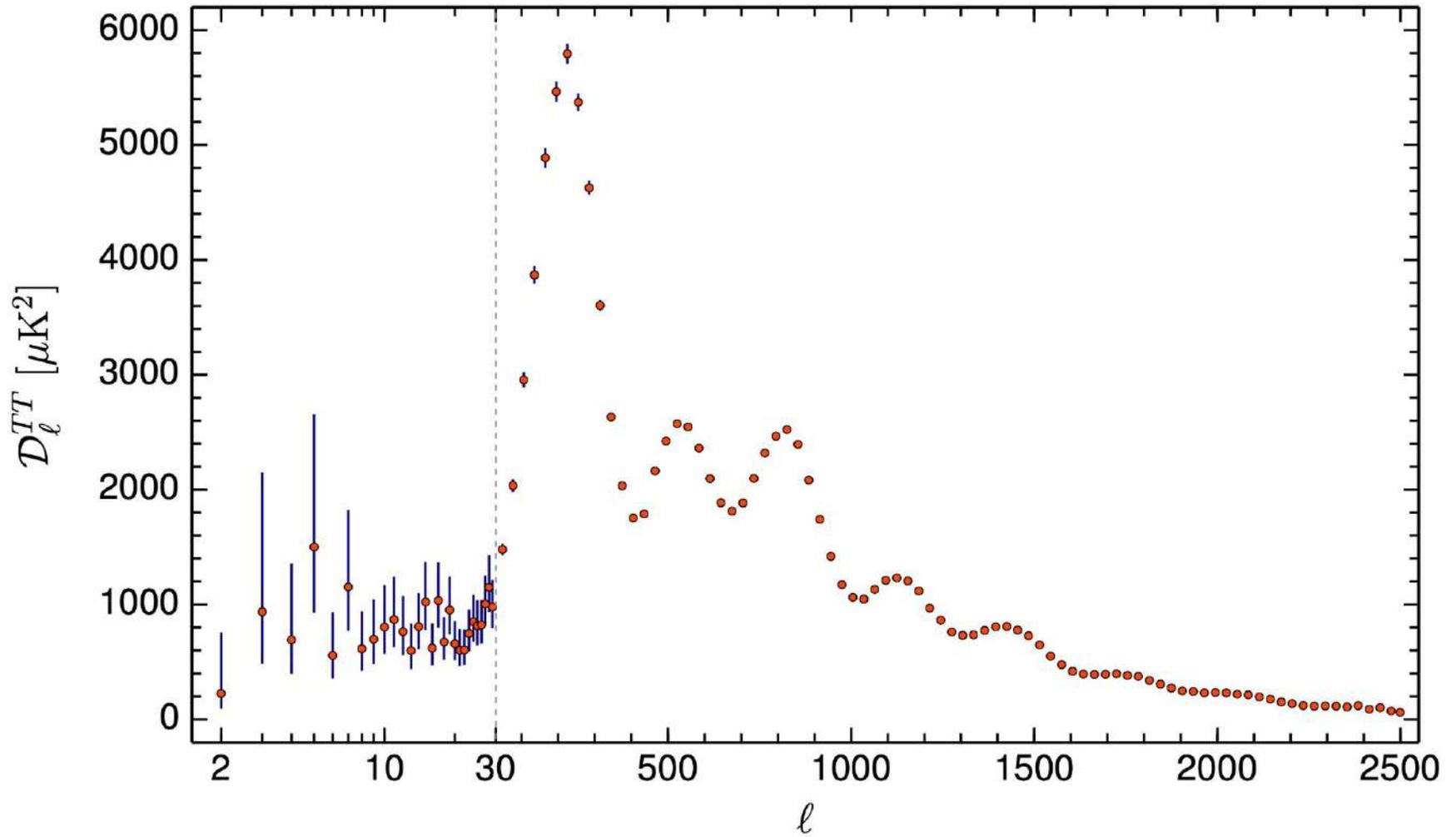


Large angular scales

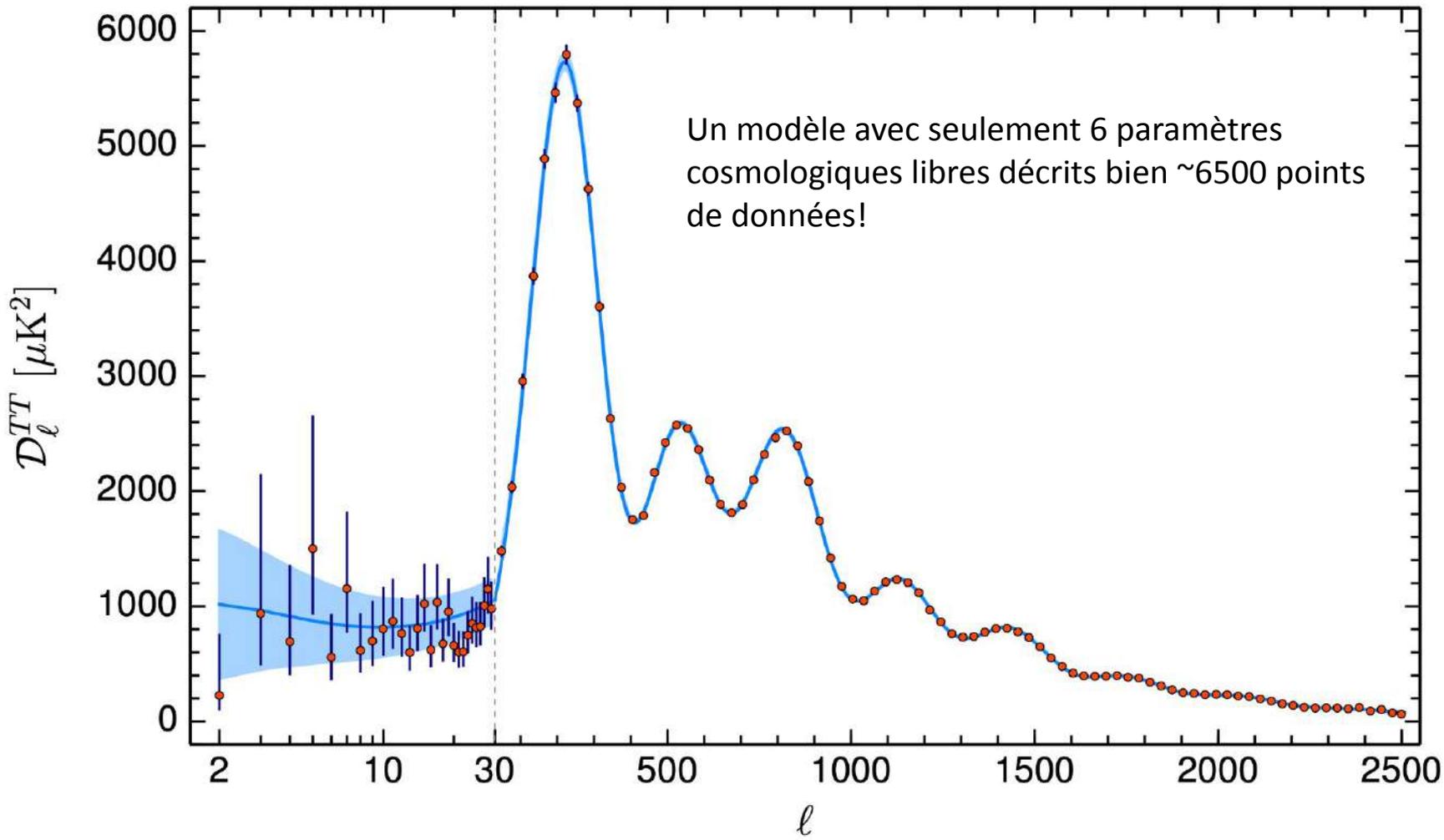


Small angular scales

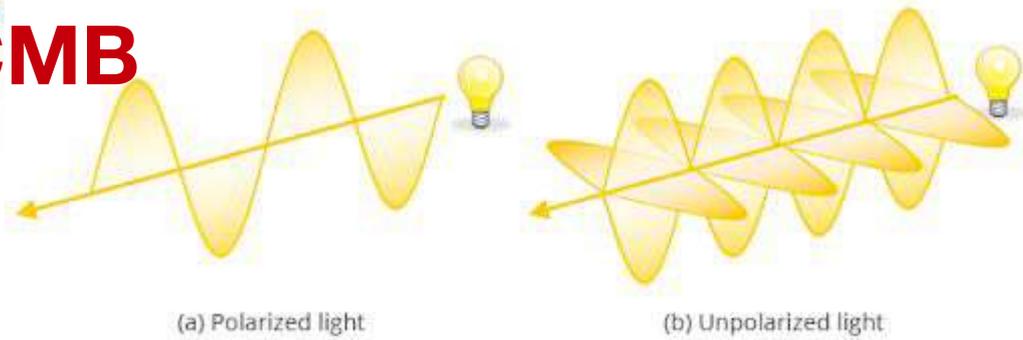
# Le spectre de puissance



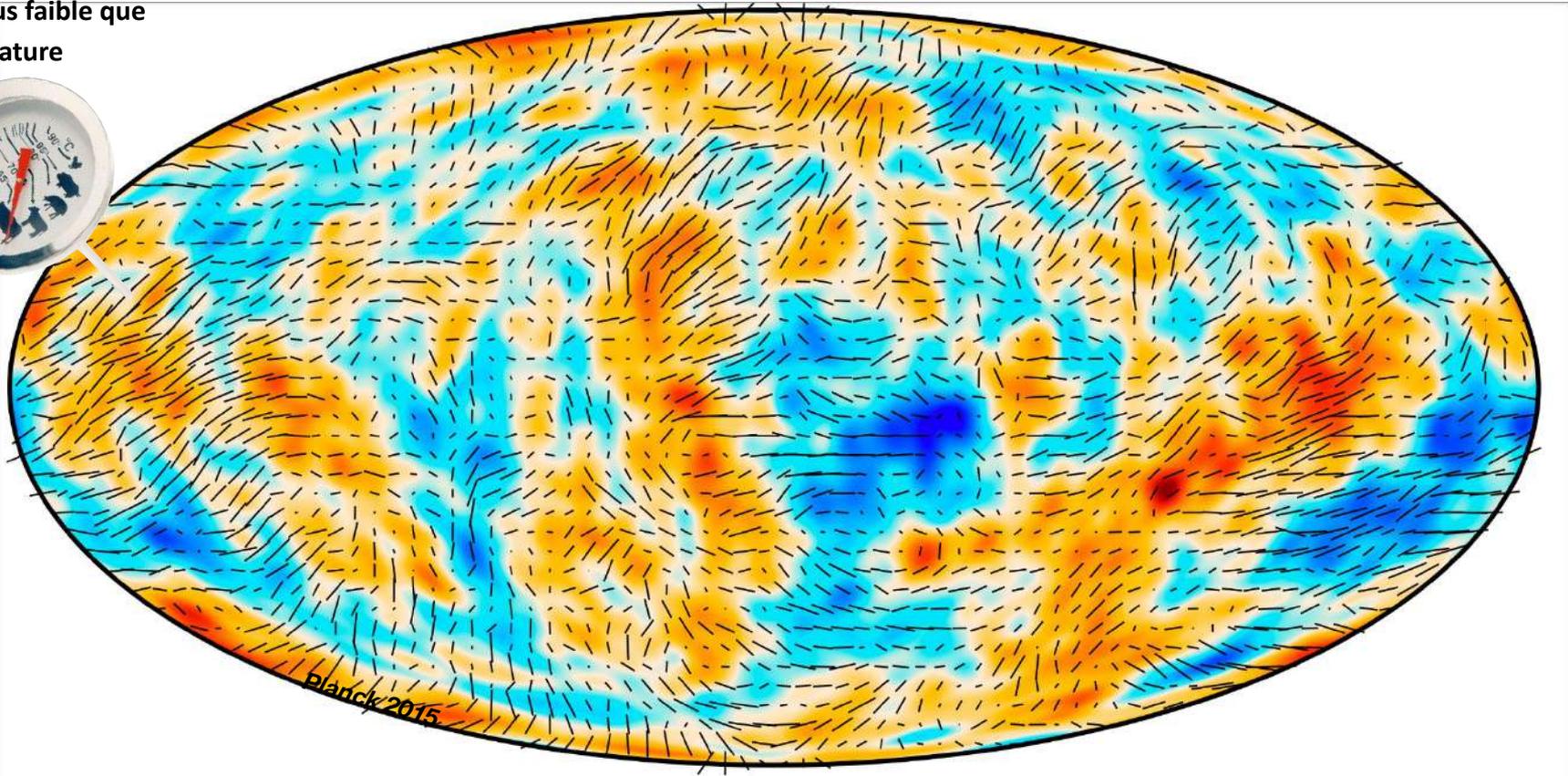
# Le spectre de puissance



# La polarisation de la CMB



10 fois plus faible que  
la température



| 0.41  $\mu\text{K}$

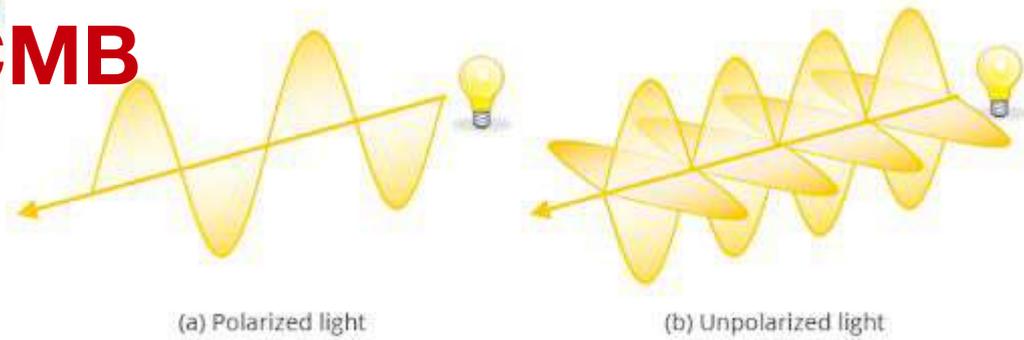
-160



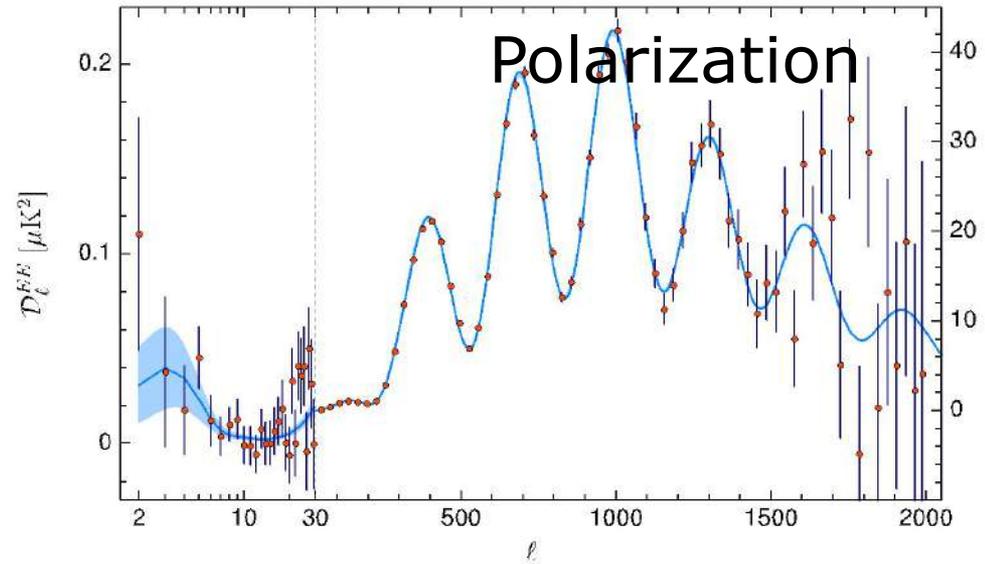
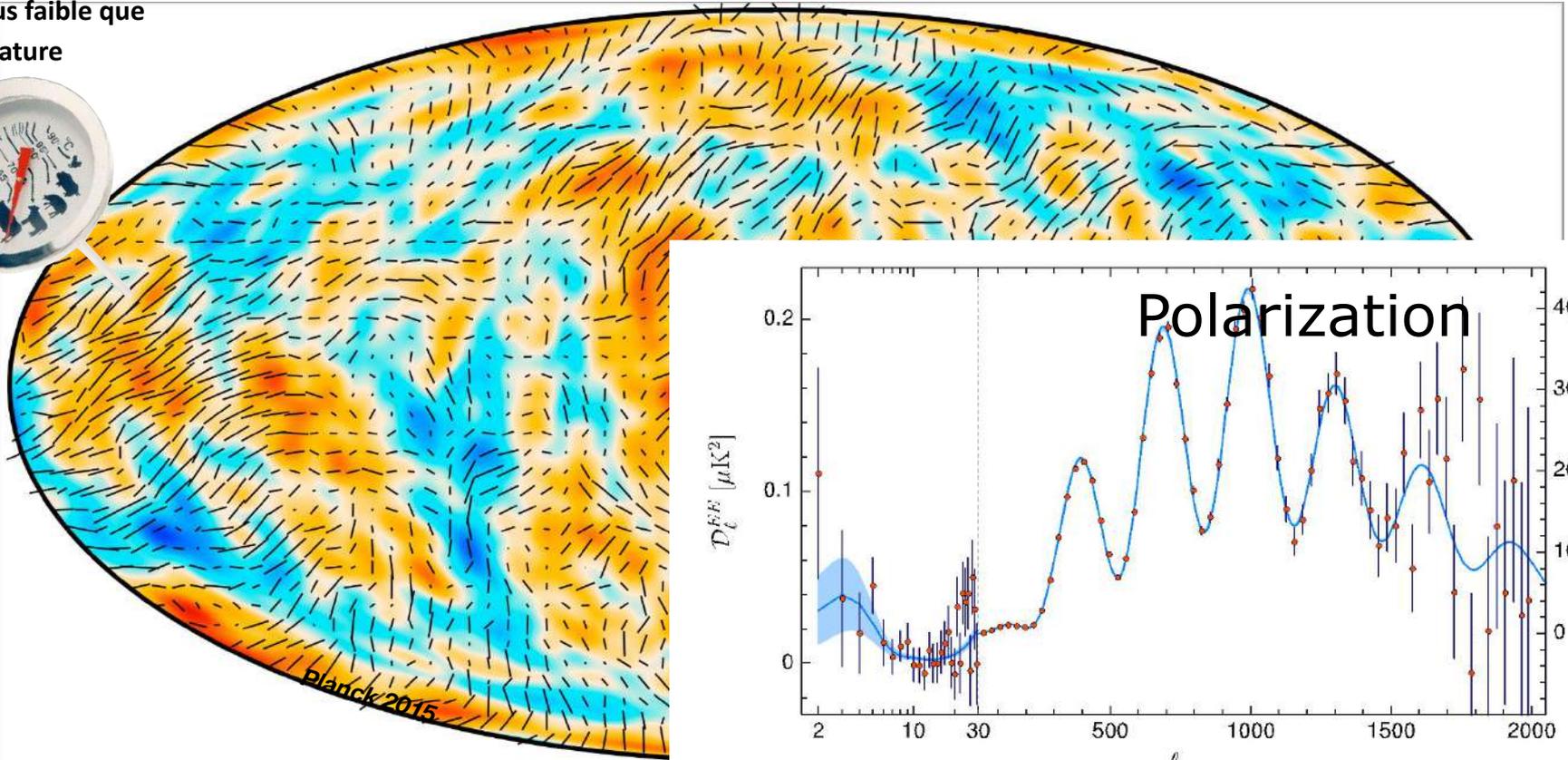
160  $\mu\text{K}$

***La lumière du rayonnement de fond cosmologique est légèrement polarisée.  
Cette polarisation porte une information complémentaire.***

# La polarisation de la CMB



10 fois plus faible que  
la température



| 0.41  $\mu\text{K}$

-160

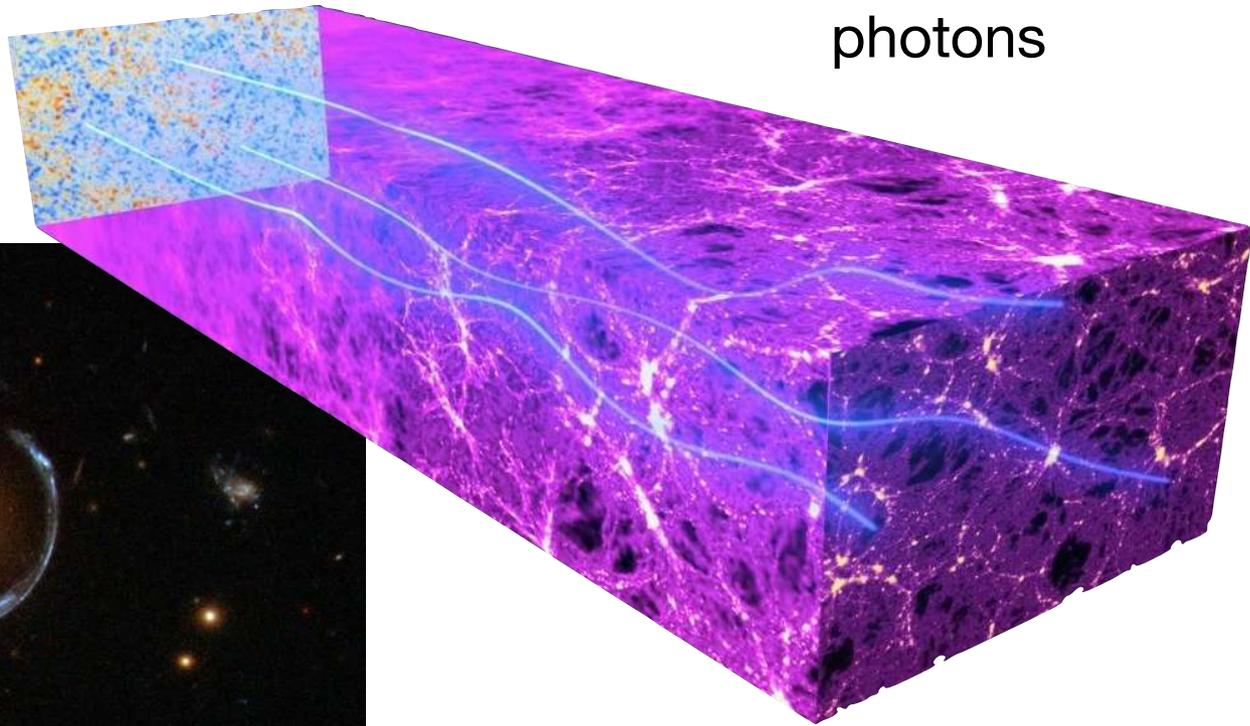


160  $\mu\text{K}$

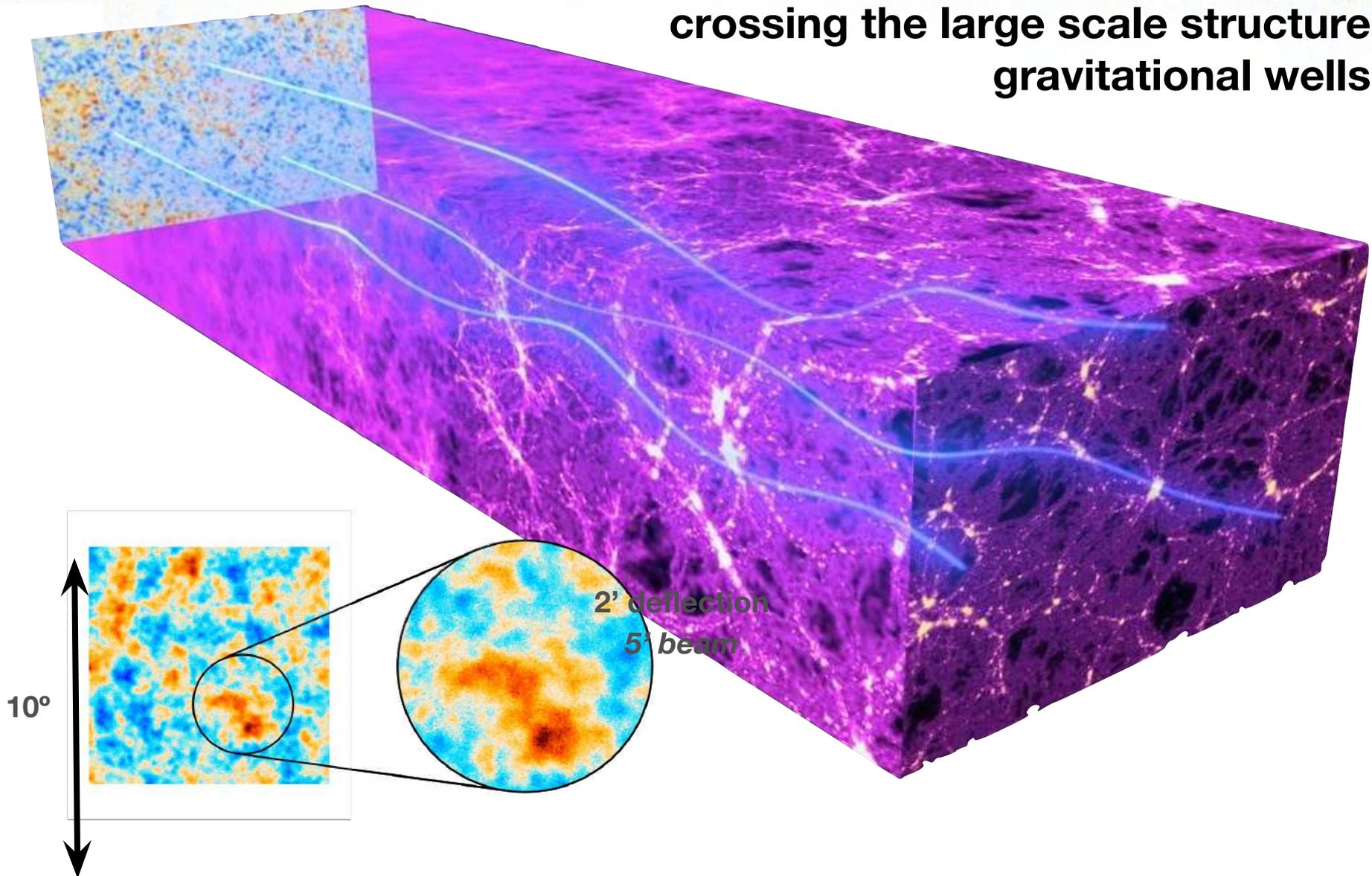
***La lumière du rayonnement de fond cosmologique est légèrement polarisée.  
Cette polarisation porte une information complémentaire.***

# Effets de lentilles gravitationnelles

Les puits de potentiels gravitationnels de la matière perturbent le trajet des photons

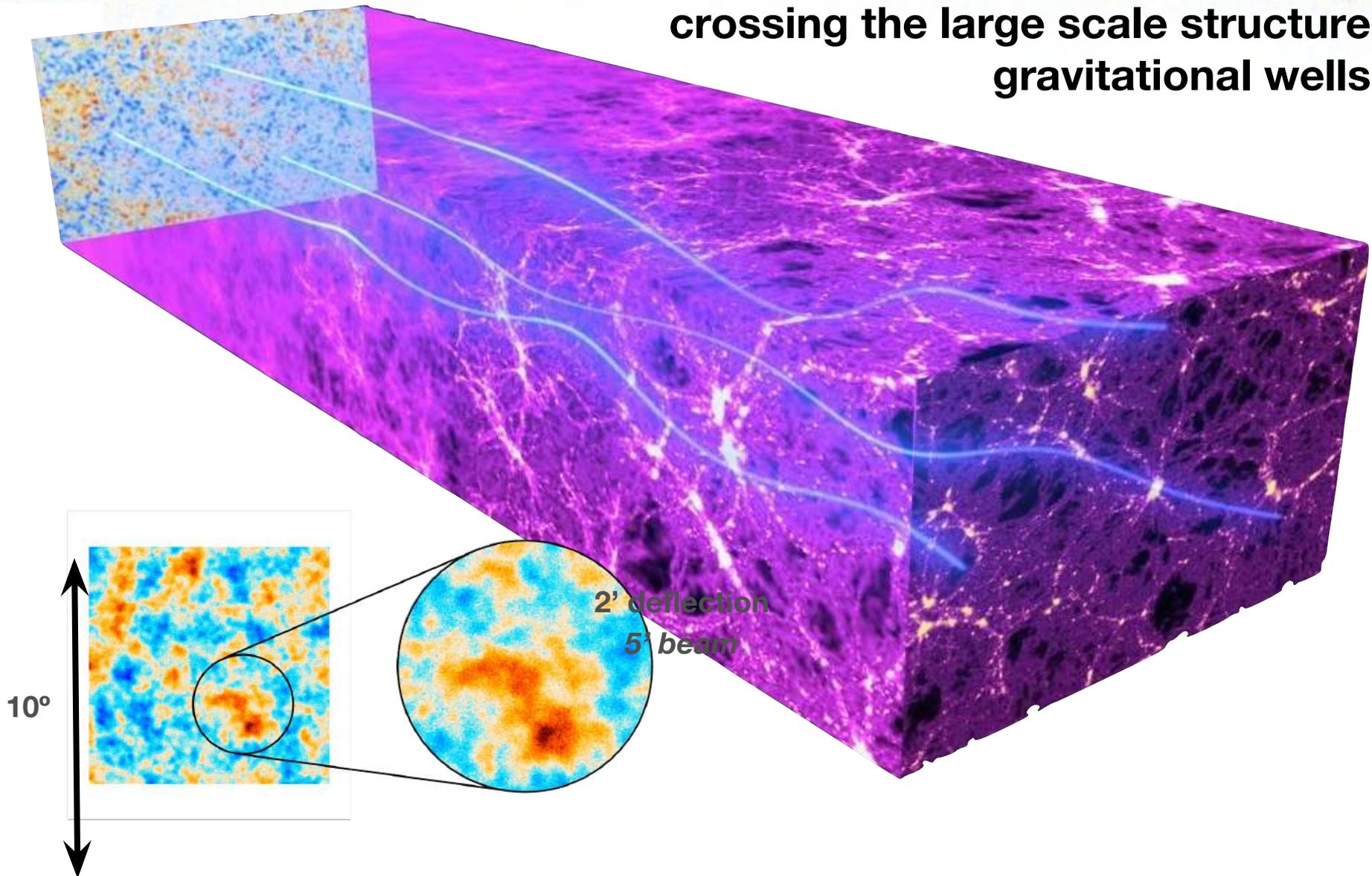


**Photon paths are deflected when crossing the large scale structure gravitational wells**



**Unlensed**

**Photon paths are deflected when crossing the large scale structure gravitational wells**

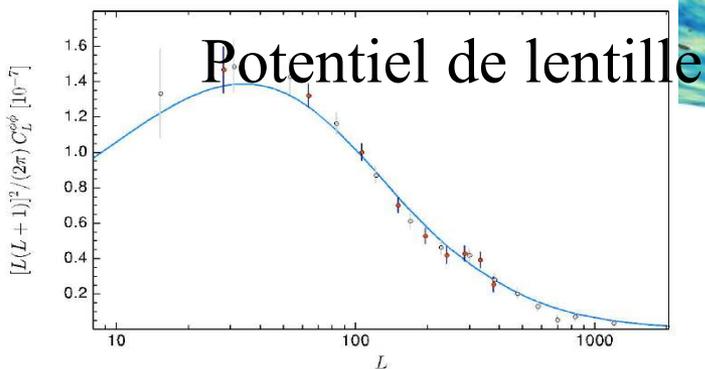
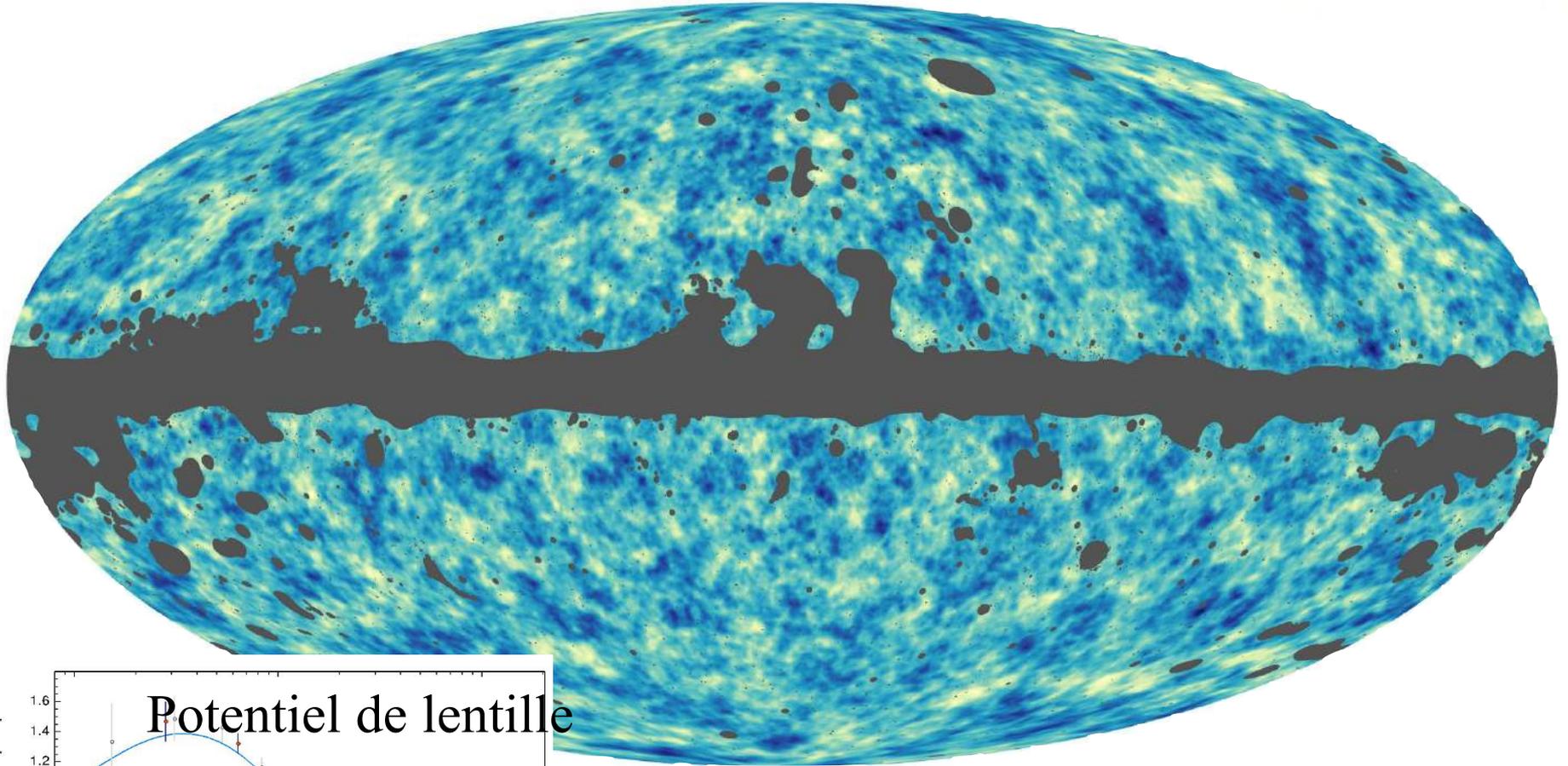


10°

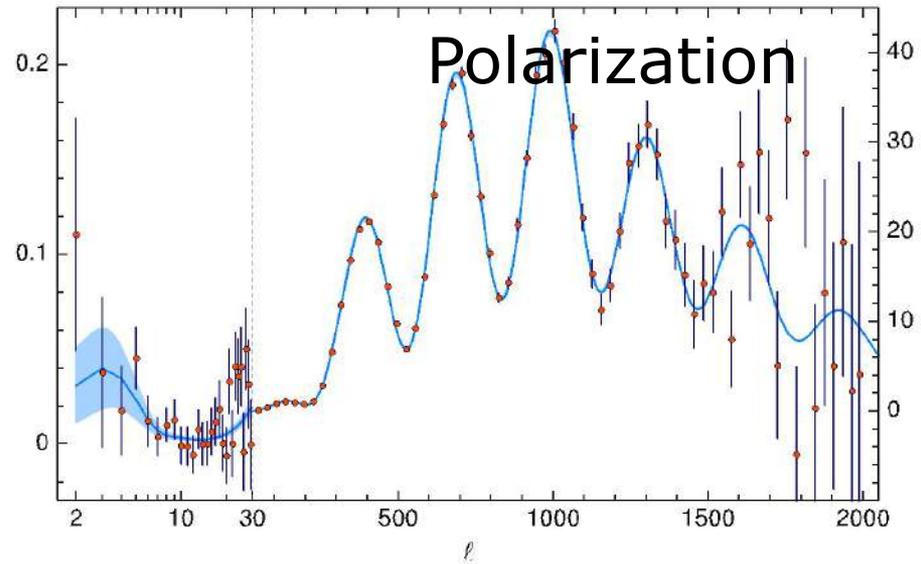
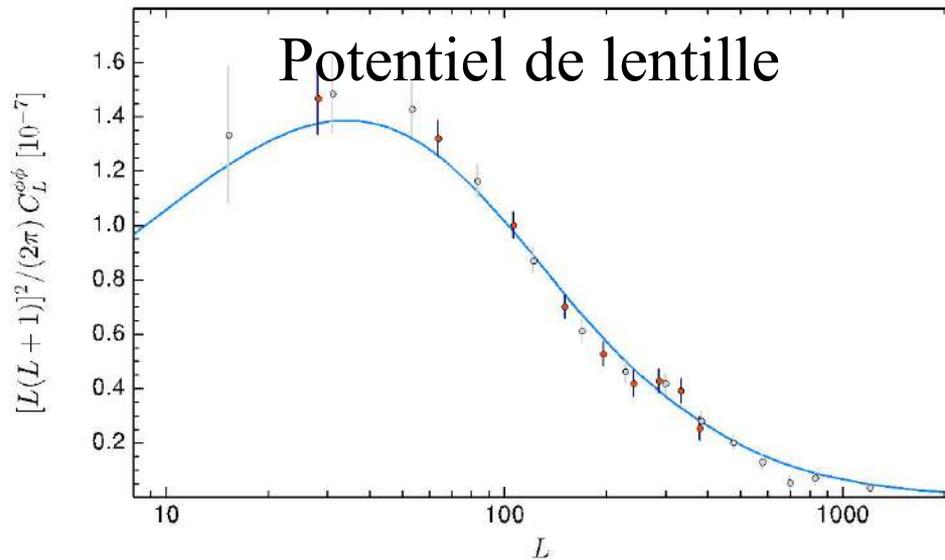
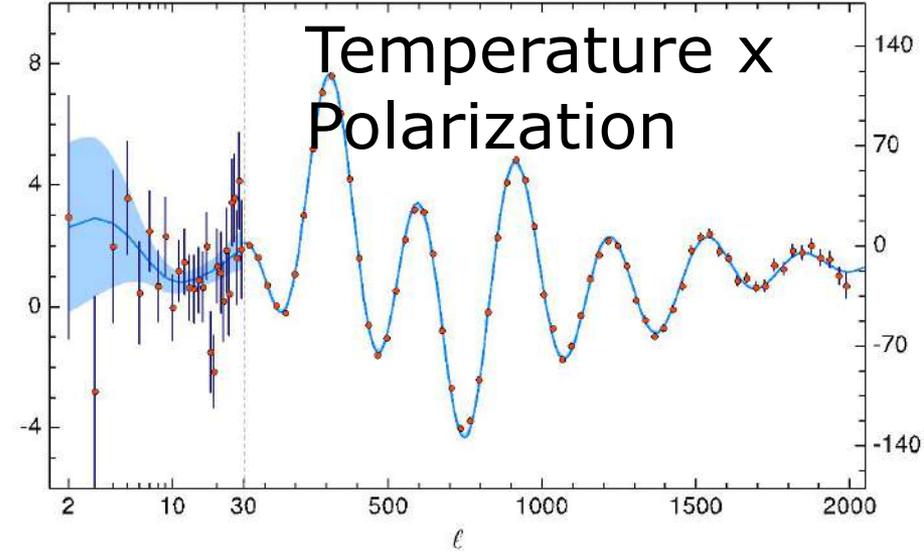
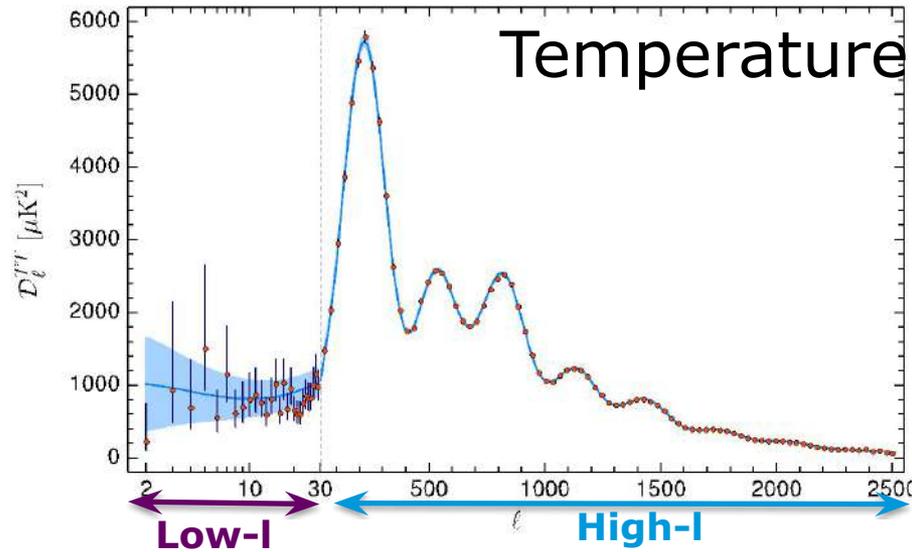
2' deflection  
5' beam

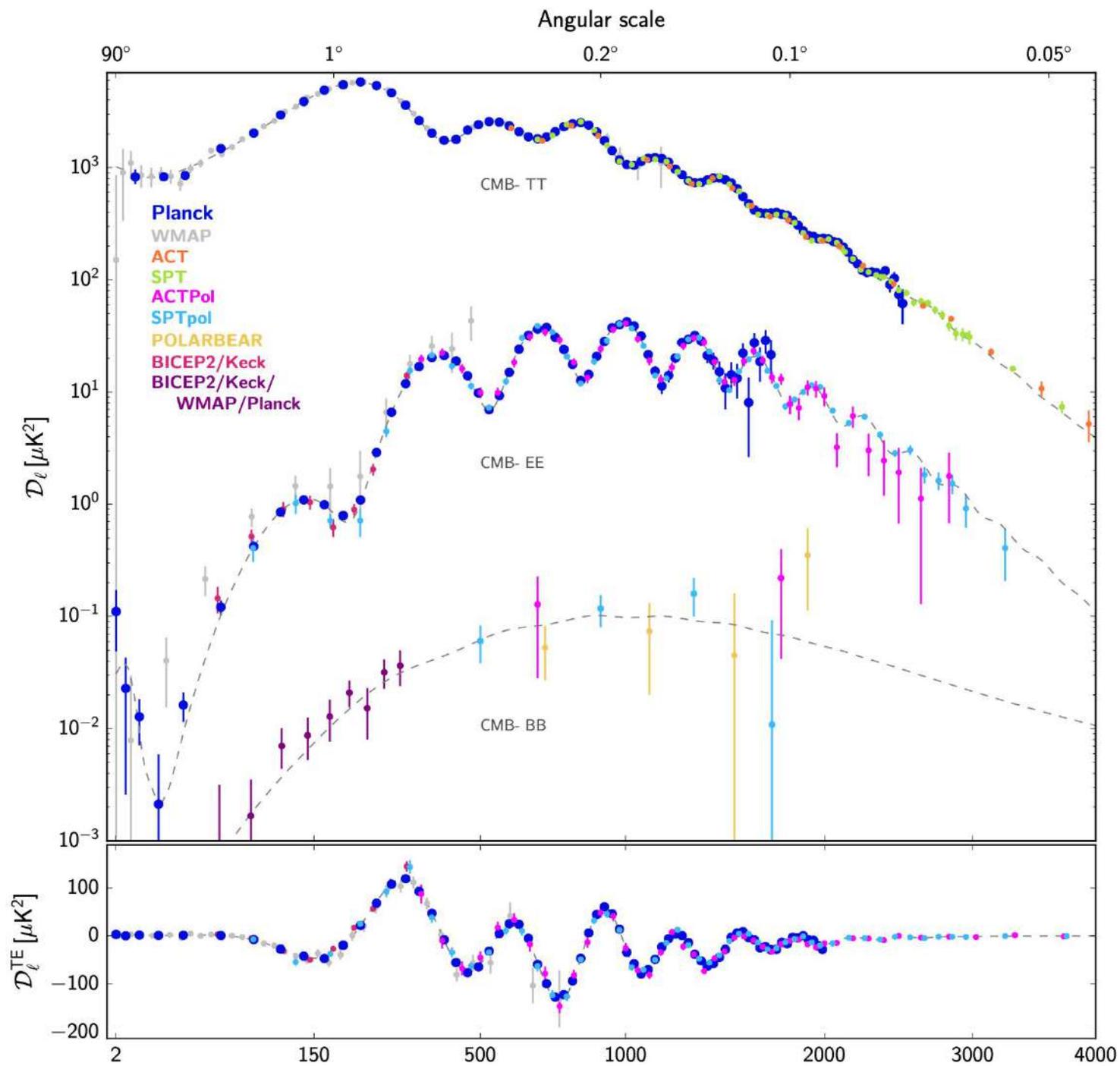
Lensed

# Potentiel de lentille gravitationnelle



# Spectre de puissance en temperature, polarization et potentiel de lentille gravitationnelle de la CMB





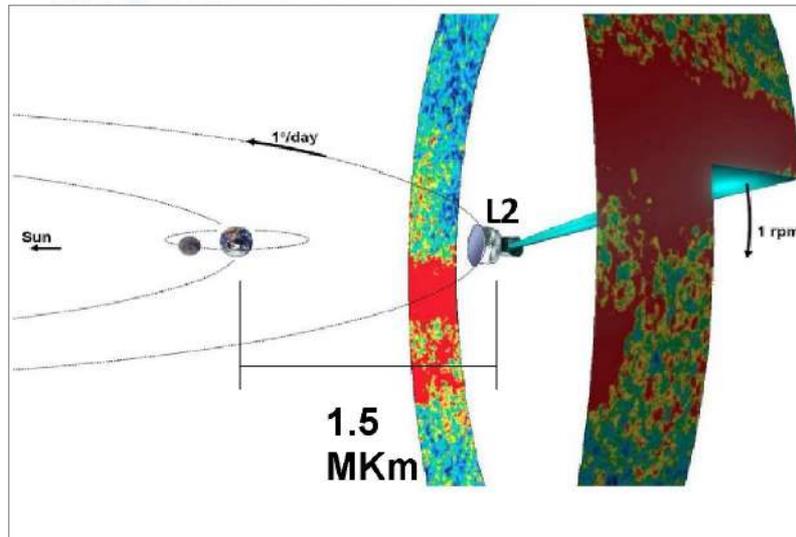
# Planck satellite



Satellite de l'ESA, conçu au début des années '90, lancé en 2009, opérationnel jusqu'en 2013.

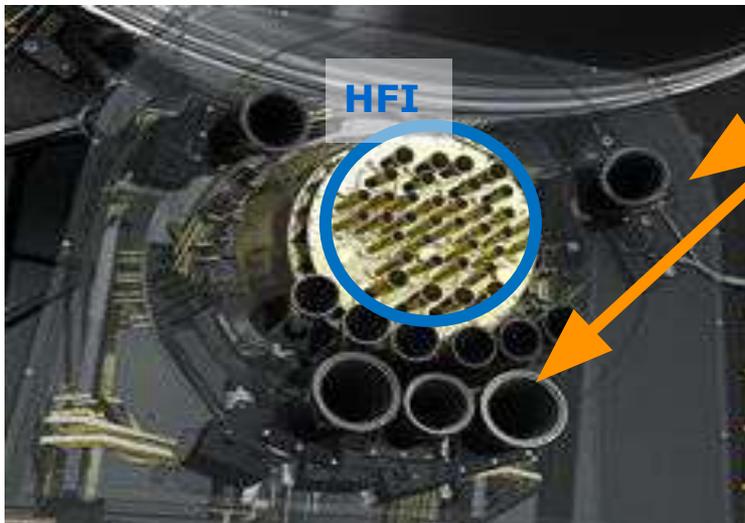


# The Planck satellite



**Objectif principal: obtenir une mesure définitive des anisotropies de température**

- Satellites de 3ème génération observant le ciel entier (COBE, WMAP)
- Lancé au point de Lagrange L2 en 2009, opérationnel jusqu'en 2013.
- **2 instruments, 9 fréquences.**
  - **Low Frequency Instrument : 22 radiomètres à 30, 44, 70 GHz.**
  - **High Frequency Instrument : 50 bolomètres à 100, 143, 217, 353, 545, 857 GHz.**
- Polarisation de 30 à 353 GHz.
- **Chaîne de refroidissement à 4 étages, descendant jusqu'à 0,1 K (le point le froid de l'univers!)**
- 3 Distributions de données
  - 2013 : 1ere année
  - 2015 : mission complete
  - 2018-2019 : Legacy



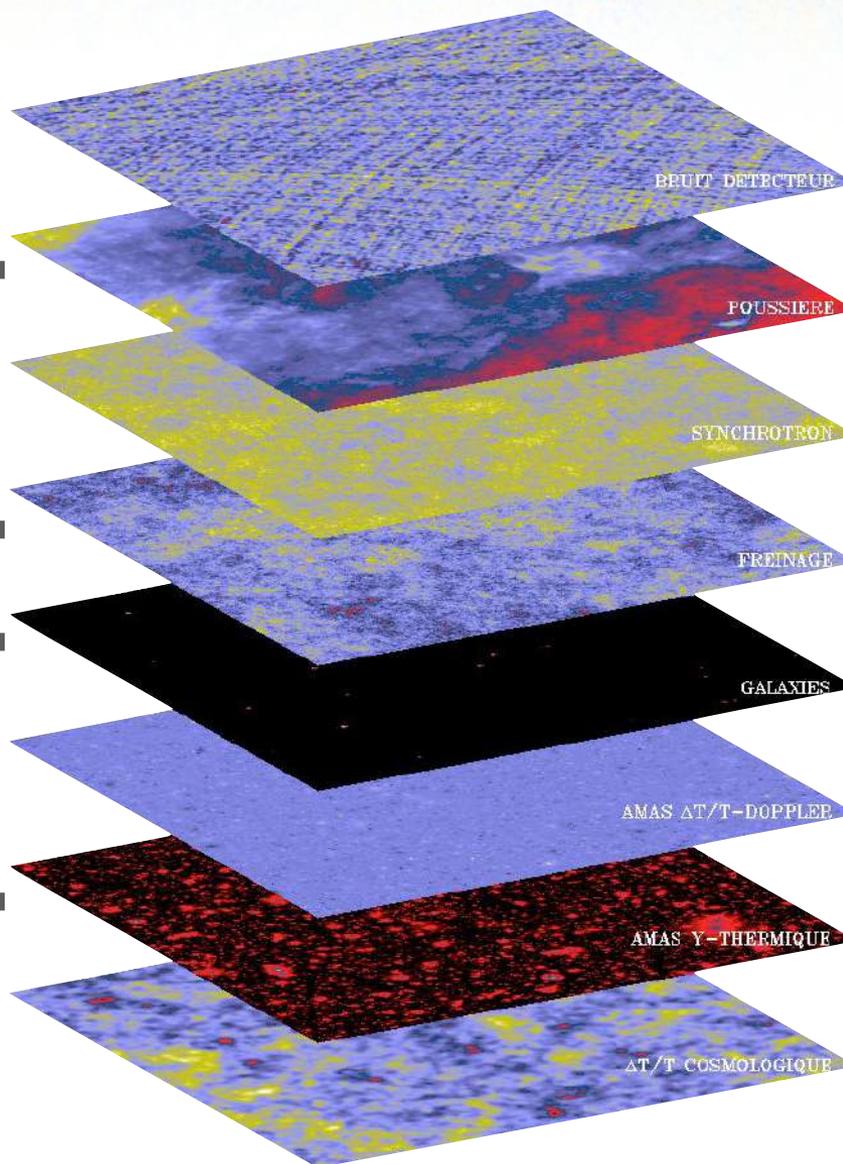
**LFI**

Detector noise & systematics

Our Galaxy

Secondary Emissions

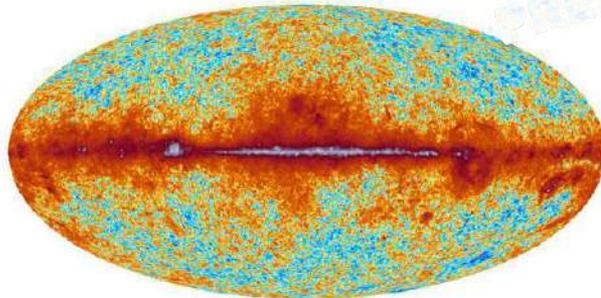
CMB



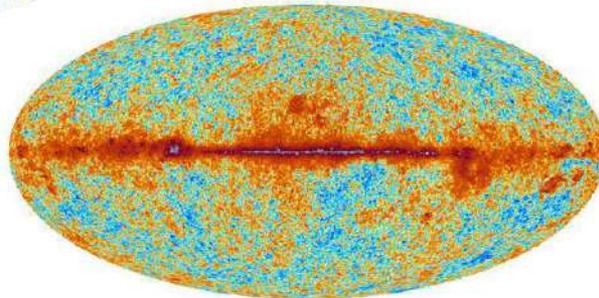
0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

PRELIMINARY

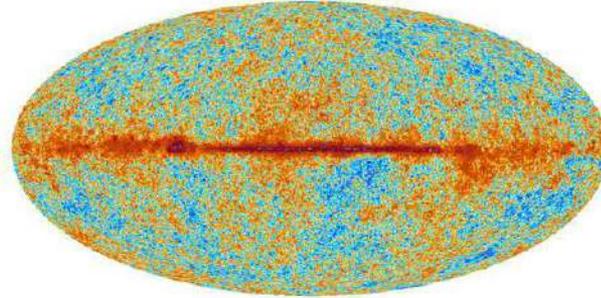
30 GHz



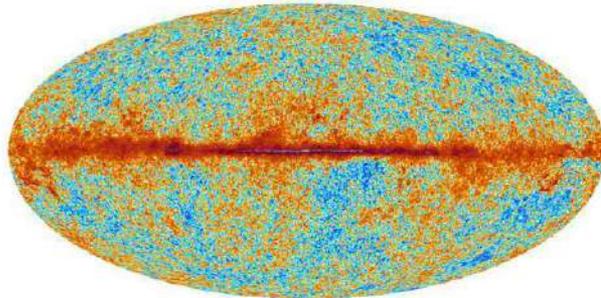
44 GHz



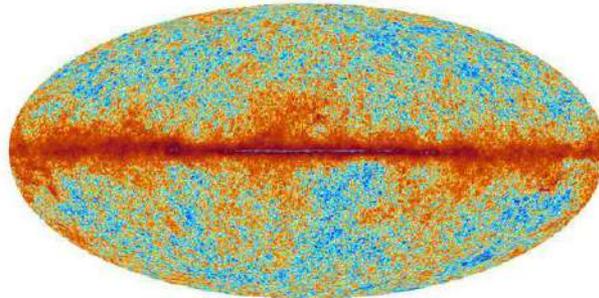
70 GHz



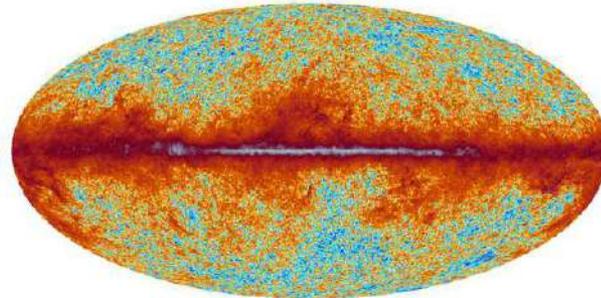
100 GHz



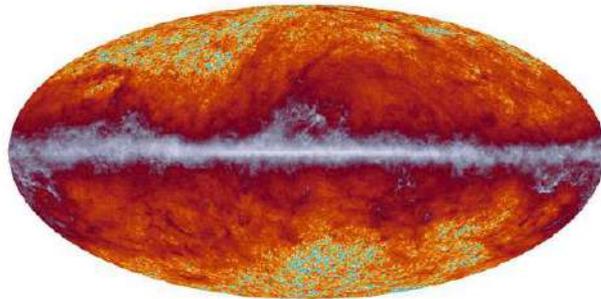
143 GHz



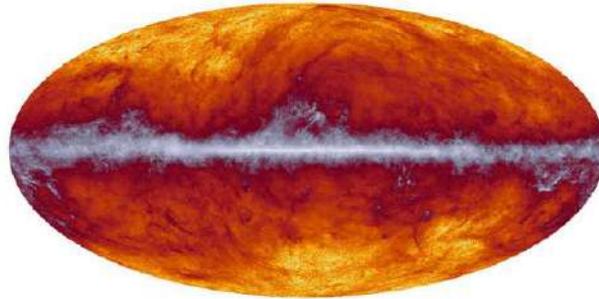
217 GHz



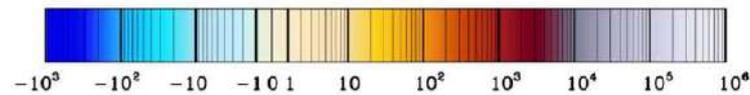
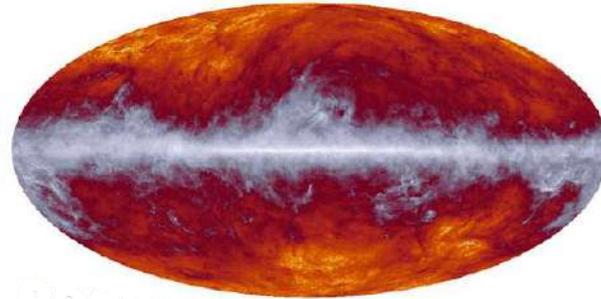
353 GHz



545 GHz



857 GHz



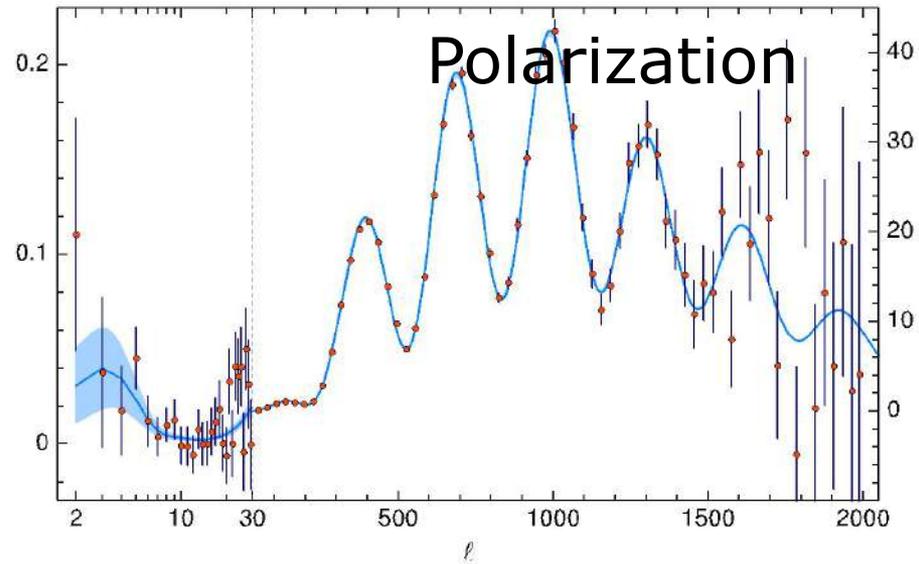
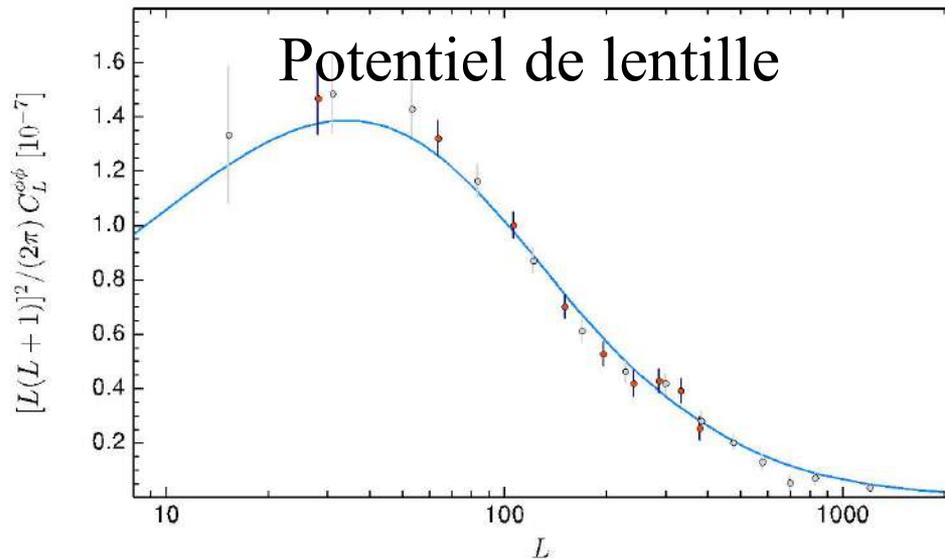
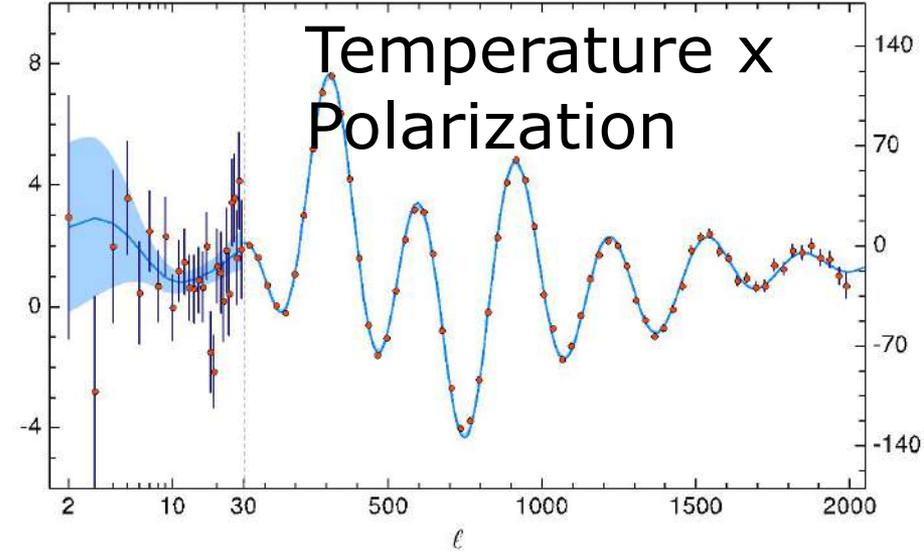
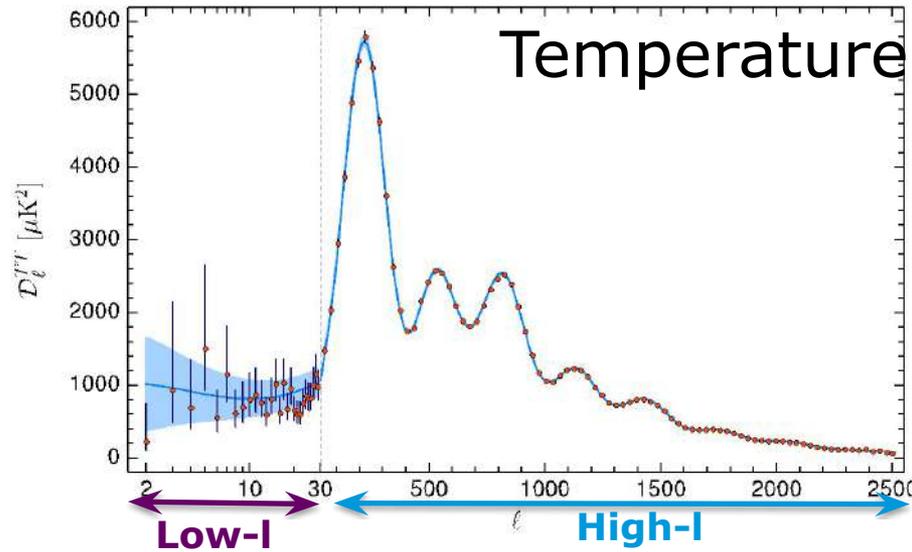
30-353 GHz:  $\delta T$  [ $\mu K_{\text{CMB}}$ ]; 545 and 857 GHz: surface brightness [kJy/sr]

PRELIMINARY

**Planck**

Microwave sky

# Spectre de puissance en temperature, polarization et potentiel de lentille gravitationnelle de la CMB



# Baseline $\Lambda$ CDM results 2018

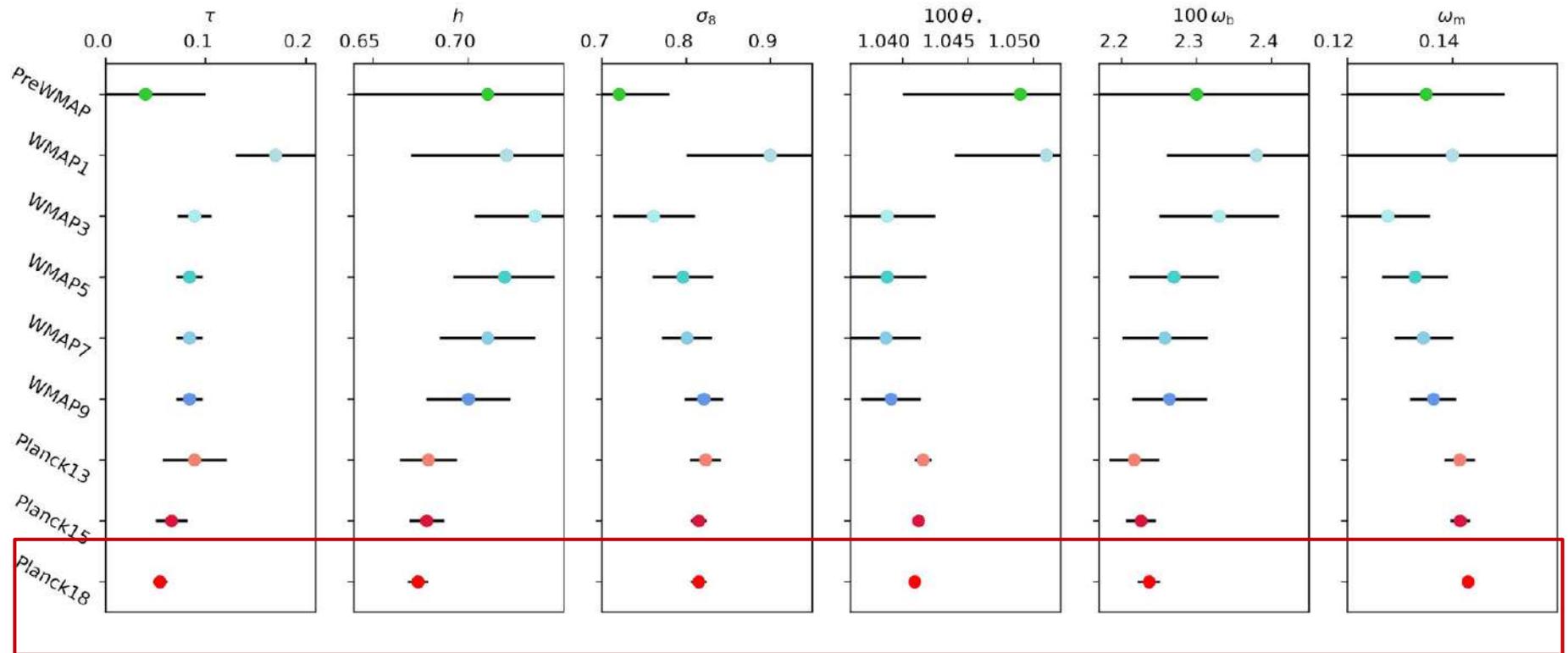
(Temperature+polarization+CMB lensing)

	Mean	$\sigma$	[%]
$\Omega_b h^2$ Baryon density	0.02237	0.00015	0.7
$\Omega_c h^2$ DM density	0.1200	0.0012	1
$100\theta$ Acoustic scale	1.04092	0.00031	0.03
$\tau$ Reion. Optical depth	0.0544	0.0073	13
$\ln(A_s 10^{10})$ Power Spectrum amplitude	3.044	0.014	0.7
$n_s$ Scalar spectral index	0.9649	0.0042	0.4
$H_0$ Hubble	67.36	0.54	0.8
$\Omega_m$ Matter density	0.3153	0.0073	2.3
$\sigma_8$ Matter perturbation amplitude	0.8111	0.0060	0.7

$\Lambda$ CDM is an excellent fit to the data.

- Most of parameters determined at (sub-) percent level!
- **Best** determined parameter is the angular scale of sound horizon  $\theta$  to **0.03%**.
- $\tau$  **lower and tighter** due to HFI data at large scales.
- $n_s$  is **8 $\sigma$**  away from scale invariance (even in extended models, always  $>3\sigma$ )
- **Best (indirect) 0.8% determination of the Hubble** constant to date.

# Evolution des contraintes sur les paramètres cosmologique

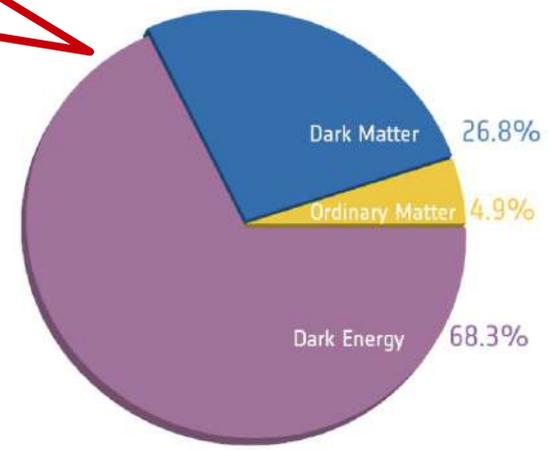


# Baseline $\Lambda$ CDM results 2018

(Temperature+polarization+CMB lensing)

	Mean	$\sigma$	[%]
$\Omega_b h^2$ Baryon density	0.02237	0.00015	0.7
$\Omega_c h^2$ DM density	0.1200	0.0012	1
$100\theta$ Acoustic scale	1.04092	0.00031	0.03
$\tau$ Reion. Optical depth	0.0544	0.0073	13
$\ln(A_s 10^{10})$ Power Spectrum amplitude	3.044	0.014	0.7
$n_s$ Scalar spectral index	0.9649	0.0042	0.4
$H_0$ Hubble	67.36	0.54	0.8
$\Omega_m$ Matter density	0.3153	0.0073	2.3
$\sigma_8$ Matter perturbation amplitude	0.8111	0.0060	0.7

Nous avons mesuré le contenu énergétique de l'Univers avec une précision de l'ordre du pourcent, voire inférieure ! Nous avons déterminé que l'âge de l'Univers est de 13,77 milliards d'années.



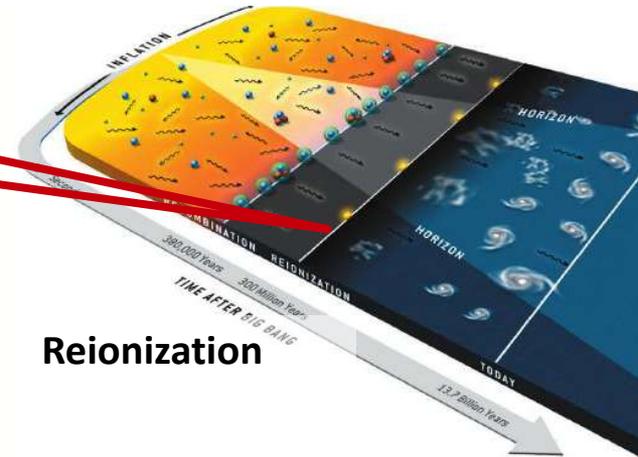
$\Lambda$ CDM is an excellent fit to the data.

# Baseline $\Lambda$ CDM results 2018

(Temperature+polarization+CMB lensing)

	Mean	$\sigma$	[%]
$\Omega_b h^2$ Baryon density	0.02237	0.00015	0.7
$\Omega_c h^2$ DM density	0.1200	0.0012	1
$100\theta$ Acoustic scale	1.04092	0.00031	0.03
$\tau$ Reion. Optical depth	0.0544	0.0073	13
$\ln(A_s 10^{10})$ Power Spectrum amplitude	3.044	0.014	0.7
$n_s$ Scalar spectral index	0.9649	0.0042	0.4
$H_0$ Hubble	67.36	0.54	0.8
$\Omega_m$ Matter density	0.3153	0.0073	2.3
$\sigma_8$ Matter perturbation amplitude	0.8111	0.0060	0.7

We established when the first stars switched on and reionized the universe, at redshift  $\sim 7$  ( $\sim 550$  Myr after the Big Bang)



Reionization

Hu & White (2004), artist B. Christie/SciAm; available at <http://background.uchicago.edu>

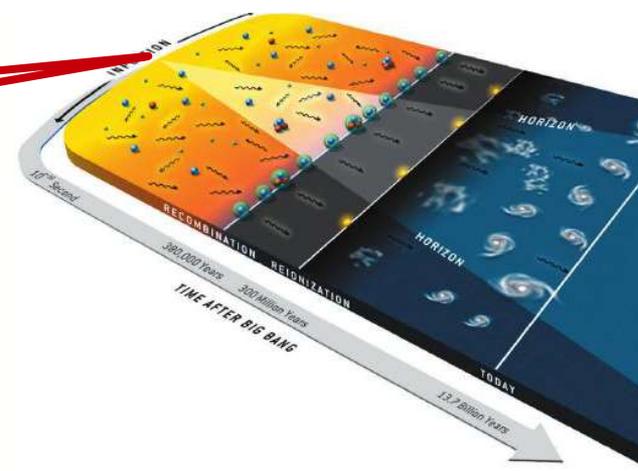
$\Lambda$ CDM is an excellent fit to the data.

# Baseline $\Lambda$ CDM results 2018

(Temperature+polarization+CMB lensing)

The theory of inflation is the best to describe current observations.

	Mean	$\sigma$	[%]
$\Omega_b h^2$ Baryon density	0.02237	0.00015	0.7
$\Omega_c h^2$ DM density	0.1200	0.0012	1
$100\theta$ Acoustic scale	1.04092	0.00031	0.03
$\tau$ Reion. Optical depth	0.0544	0.0073	13
$\ln(A_s 10^{10})$ Power Spectrum amplitude	3.044	0.014	0.7
$n_s$ Scalar spectral index	0.9649	0.0042	0.4
$H_0$ Hubble	67.36	0.54	0.8
$\Omega_m$ Matter density	0.3153	0.0073	2.3
$\sigma_8$ Matter perturbation amplitude	0.8111	0.0060	0.7



Lu & White (2004), artist B. Christie/SciAm; available at <http://background.uchicago.edu>

$\Lambda$ CDM is an excellent fit to the data.

# Extensions, curiosities and new mysteries

No evidence of preference for extensions of  $\Lambda$ CDM from Planck (and non-classical ones: dm annihilation, variation of fund. constants, primordial magnetic fields, variations in recombination, isocurvature, sterile neutrinos, dark energy, modified gravity etc.. ).....

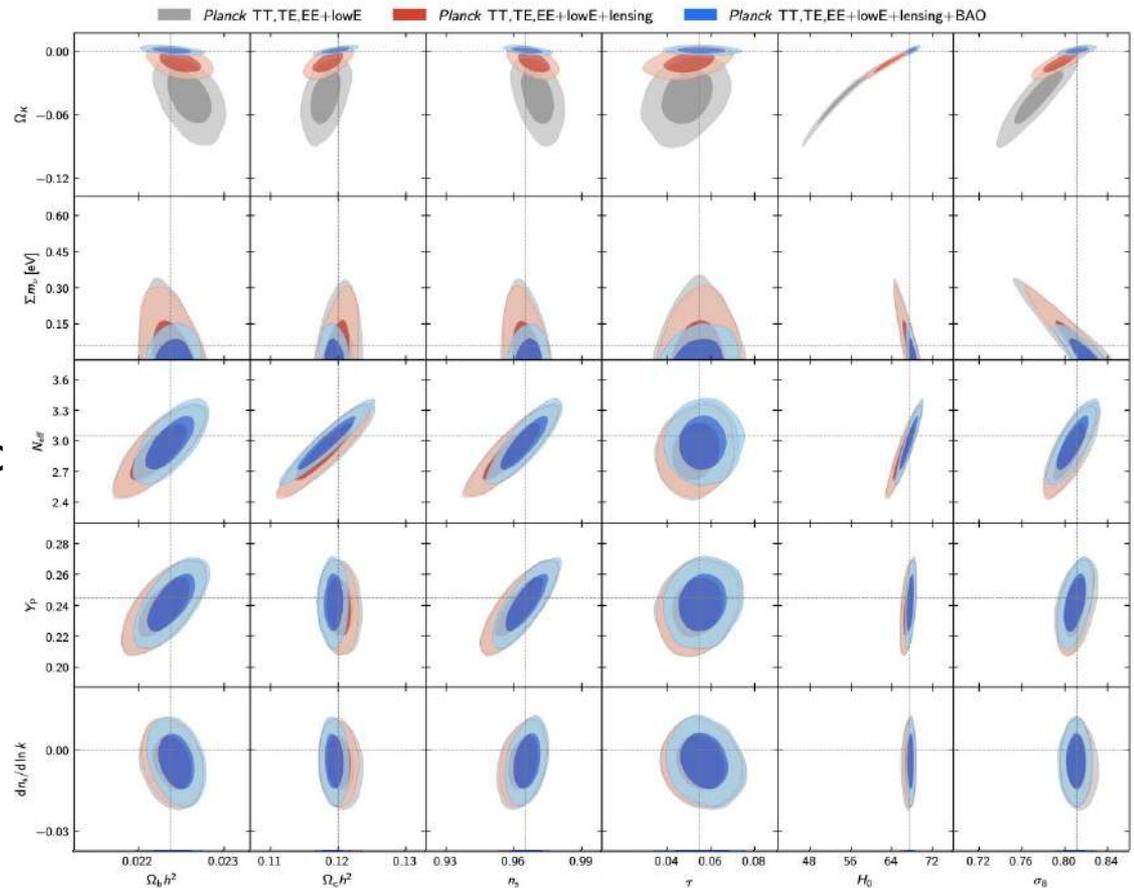
Curvature

Neutrino mass

Number of relativistic species

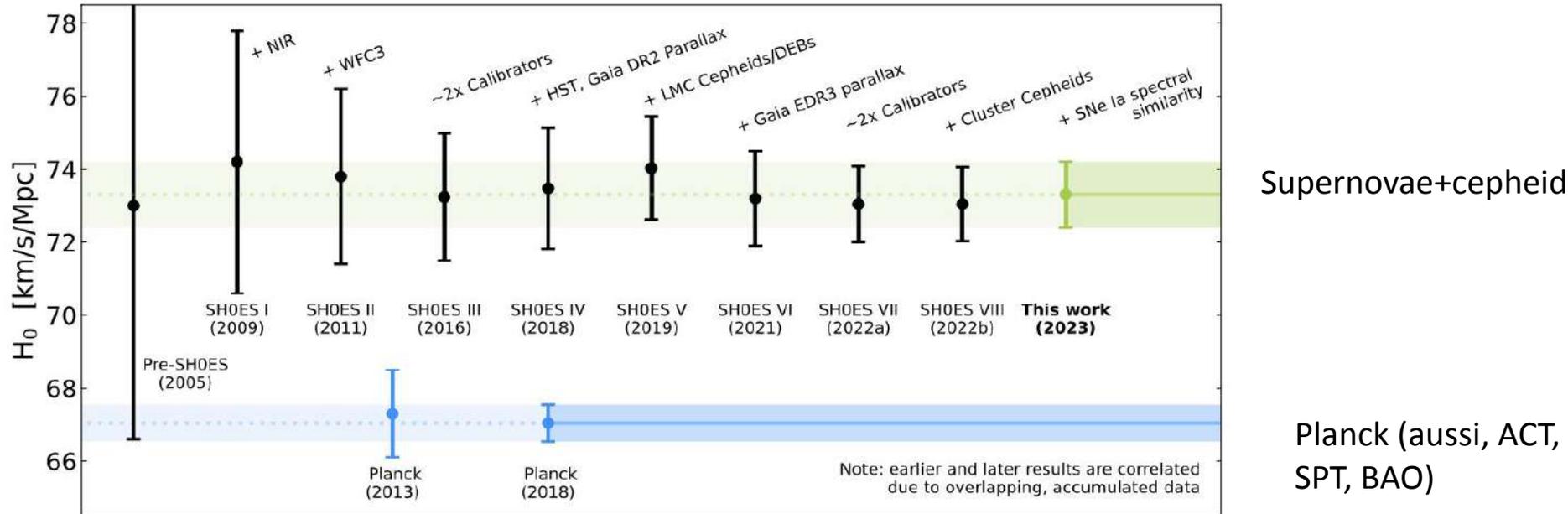
Helium abundance

Running of the spectral index



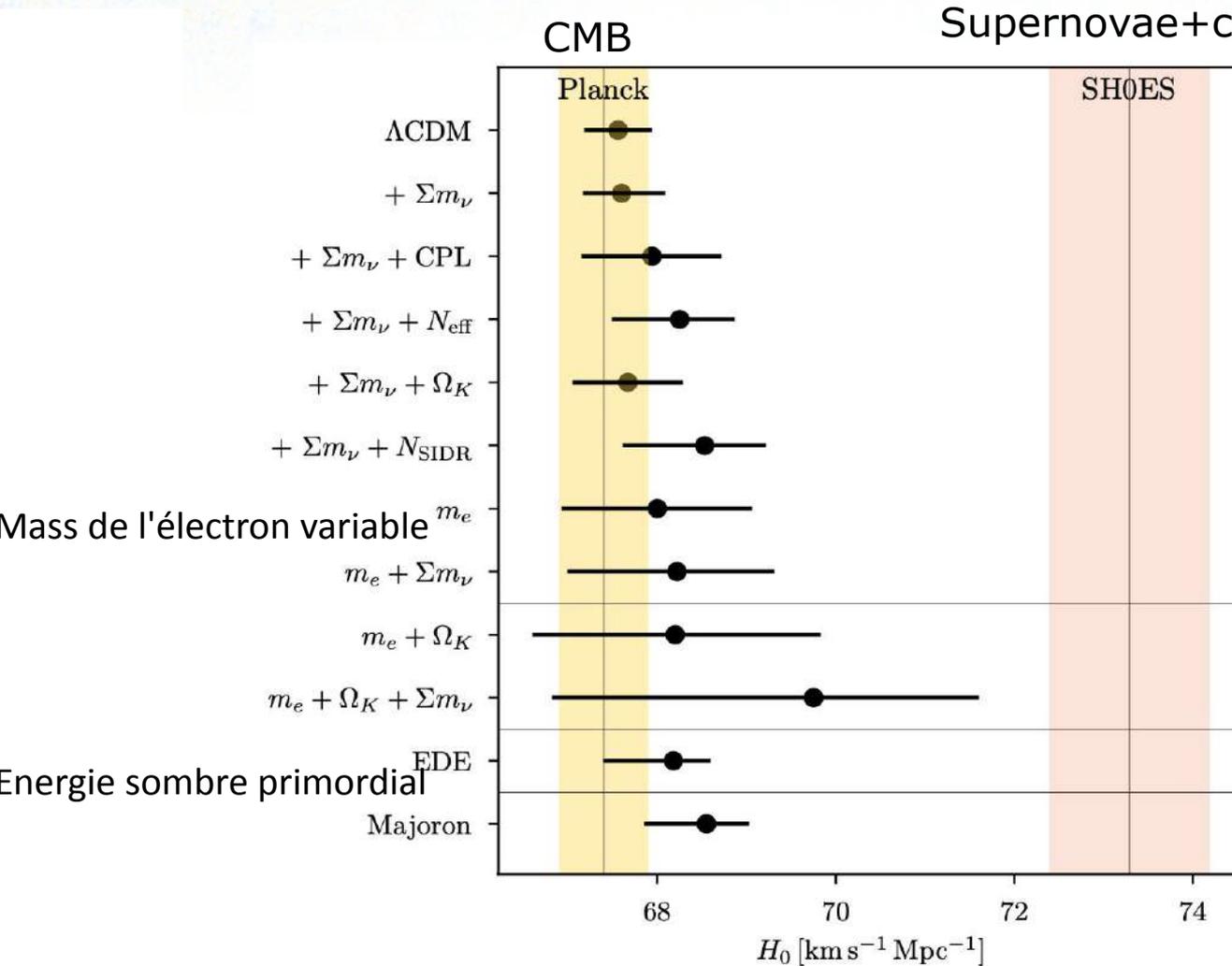
but a few **curiosities** ( $A_{\text{Lens}}$ , curvature MG, low- $l$  vs high- $l$  parameters?!) and **tensions** ( $H_0$ )....

# The Hubble tension



La tension de Hubble est une divergence entre deux mesures du **taux d'expansion de l'Univers**. La première utilise l'observation d'objets proches, tandis que la seconde se base sur le fond diffus cosmologique (CMB). **Cette différence suggère une possible lacune dans notre compréhension de la cosmologie et de la physique. Ça pourrait indiquer la découverte de la nouvelle physique!**

# Nouvelle physique pour expliquer la tension de Hubble



Ali Rida Khalife

Data: **Planck+SPT-3G 2018+  
BAO + SN Ia**

Seuls quelques modèles restent viables pour résoudre la tension (la littérature en propose d'autres, mais...).

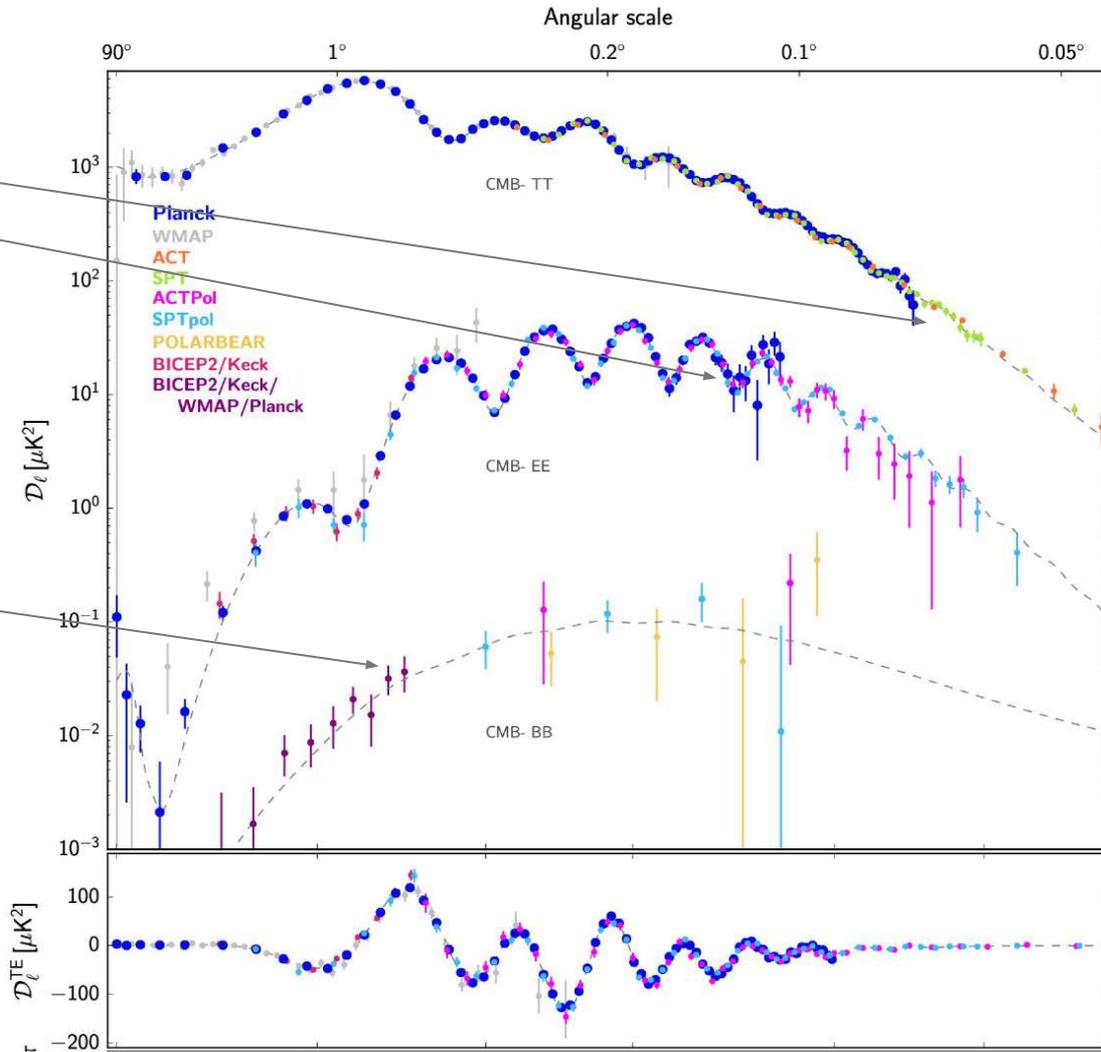
A. Rida Khalife, M. Baryhami, SG, J. Lesgourgues, K. Benabed 2024

# Encore énormément d'information à découvrir

Objectifs principaux:

**Mesurer les anisotropies du CMB à petite échelle, en polarization:** pour contraindre les modèles cosmologiques et la nature de la matière noire et de l'énergie sombre.

**Caractériser la polarisation du CMB à grande échelle:** pour rechercher des ondes gravitationnelles primordiales et mieux comprendre l'inflation cosmique.



# Expériences actuellement menées au sol



**ACT, Polarbear, and soon Simons  
Observatory in the Atacama desert**

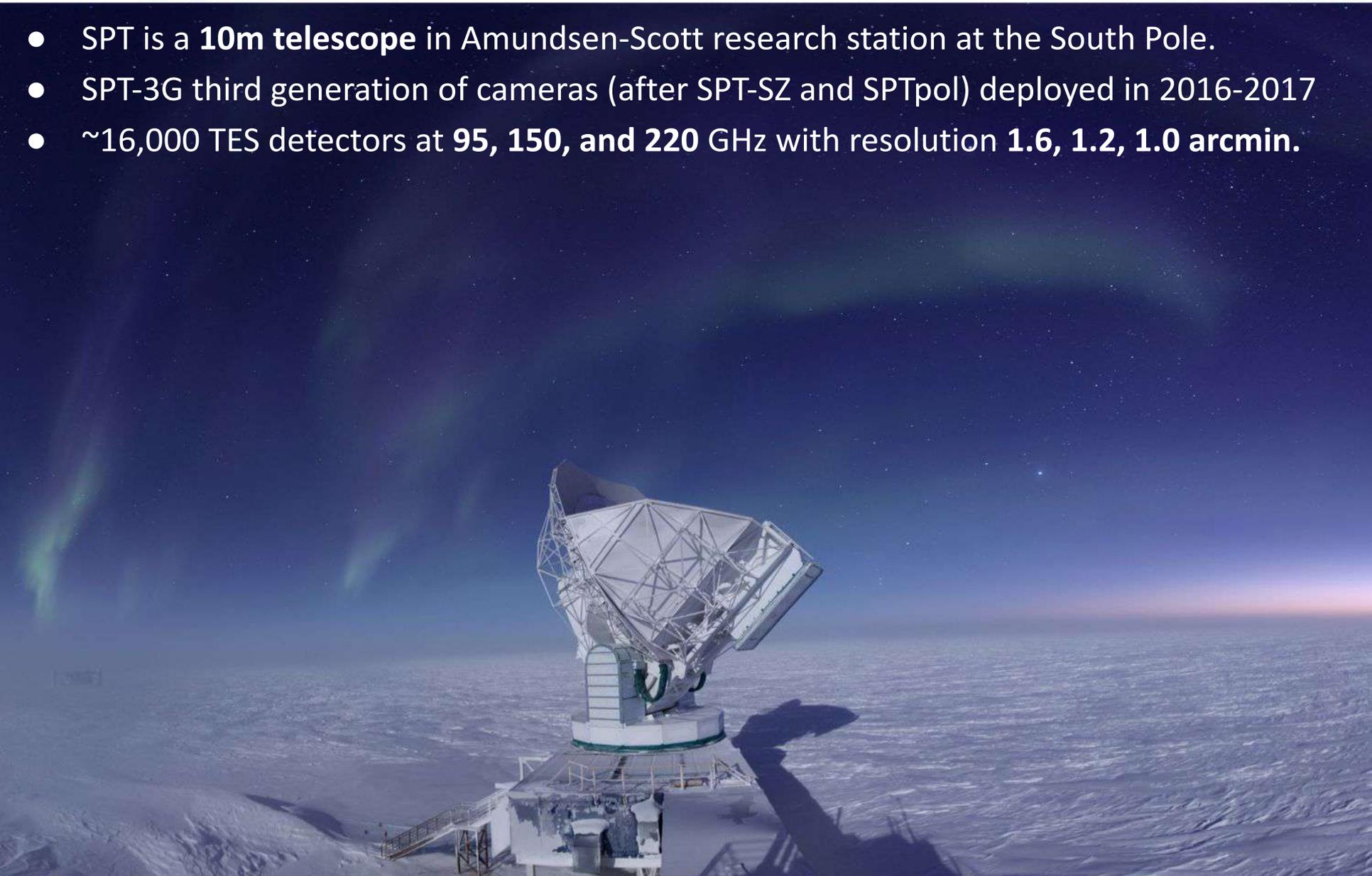


**South Pole Telescope, BICEP/Keck at the  
South Pole**

Les expériences au sol sont situées dans des régions sèches et en altitude pour minimiser les interférences atmosphériques car la vapeur d'eau absorbe les micro-ondes.

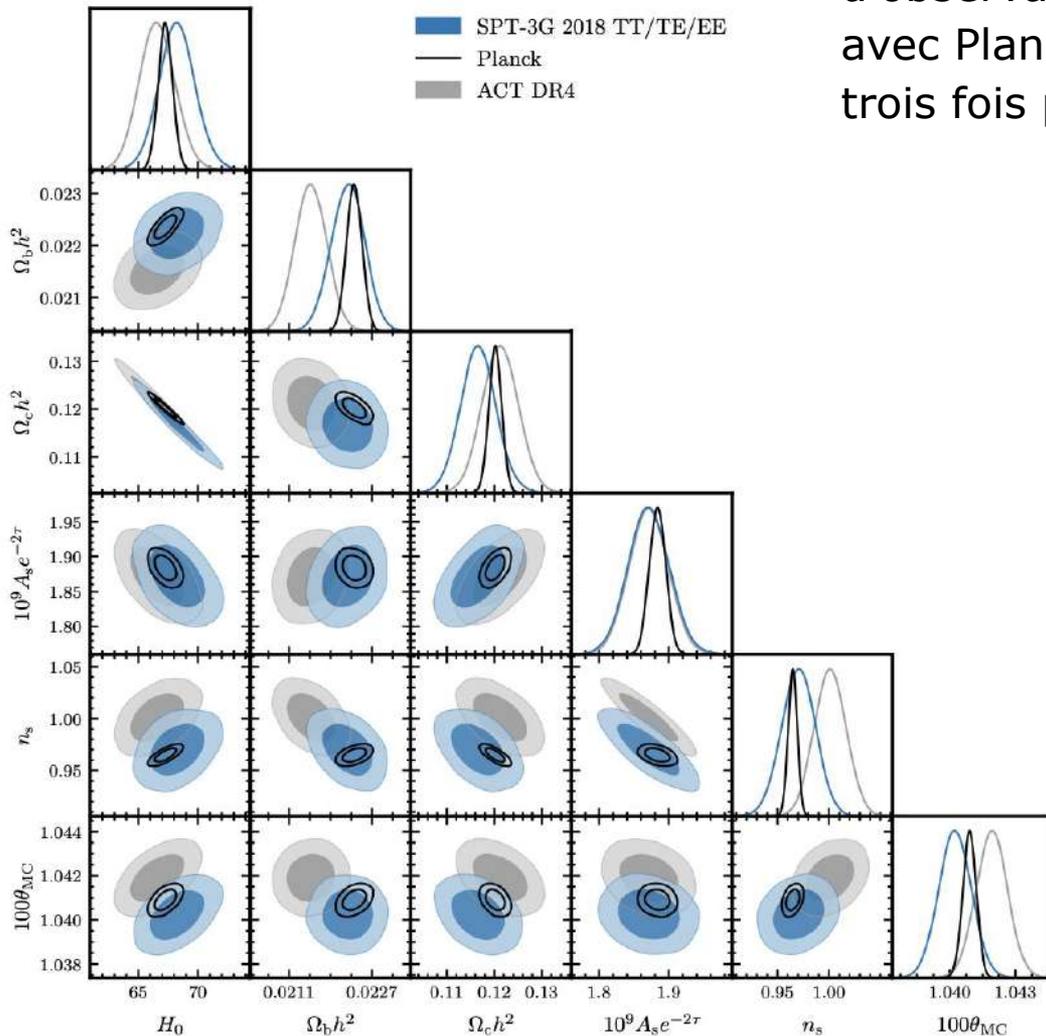
# The South Pole Telescope

- SPT is a **10m telescope** in Amundsen-Scott research station at the South Pole.
- SPT-3G third generation of cameras (after SPT-SZ and SPTpol) deployed in 2016-2017
- ~16,000 TES detectors at **95, 150, and 220 GHz** with resolution **1.6, 1.2, 1.0 arcmin**.



# The South Pole Telescope

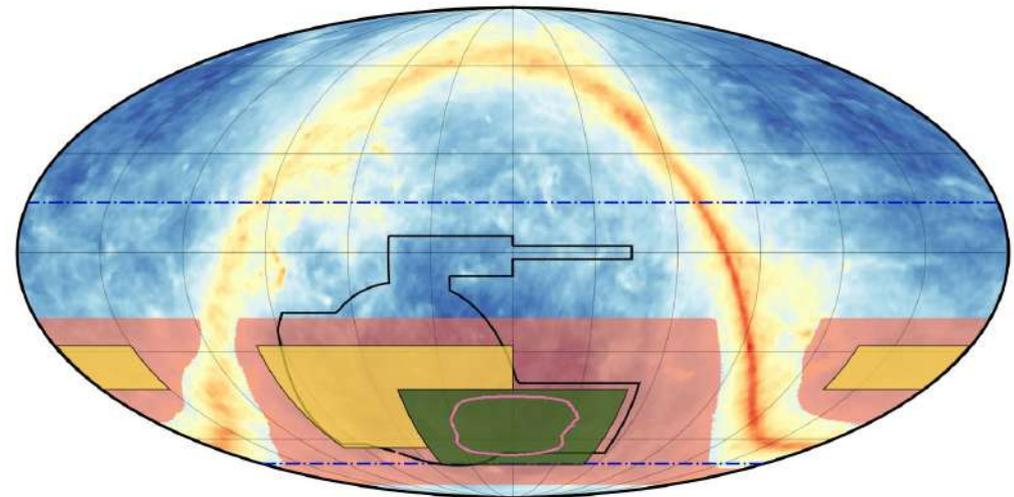
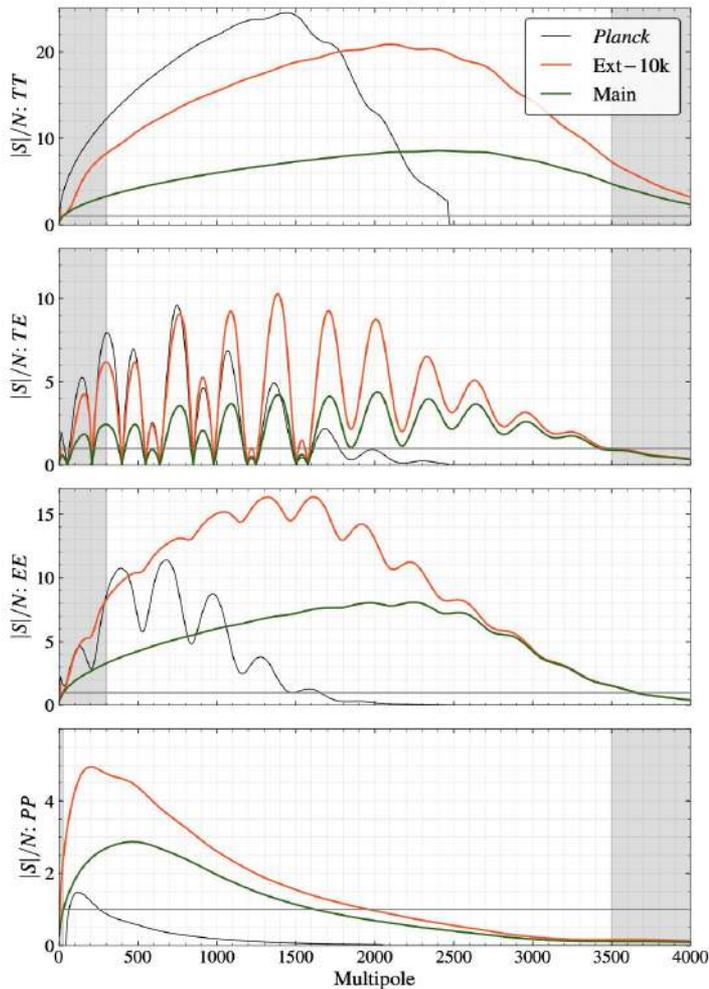
Les résultats des premiers 4 mois d'observations de SPT-3G sont en accord avec Planck, mais avec des bandes d'erreur trois fois plus grandes.



Lennart Balkenhol

# The South Pole Telescope

SPT-3G va observer 25% du ciel avec une sensibilité qui est entre 3 et 17 fois meilleure que celle de Planck, et une résolution angulaire six fois meilleure.



■ SPT-3G Main    ■ SPT-3G Summer    ■ SPT-3G Wide  
- - - SO/LSST    - - - BICEP3    - - - DES

# SPT-3G Team at IAP

## Phd student:

- **Aline Vitrier** Wide fields



## Postdocs:

- **Etienne Camhuis** 19/20 Winter field
- **Federica Guidi** 19/20 Summer field
- **Ali Rida Khalife** Theory models
- **Lennart Balkenhol** Likelihood code



## Staff (all also Planck team):

- Eric Hivon
- Karim Benabed
- François Bouchet
- Silvia Galli

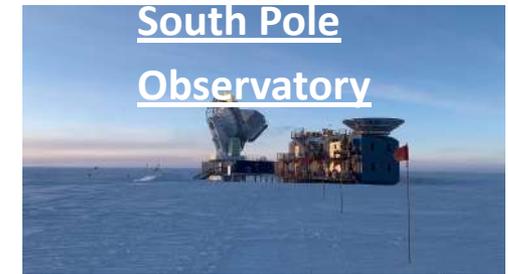
# Expériences dans le futur proche et le futur lointain

Objectifs principaux:

**Mesurer les anisotropies du CMB à petite échelle, en polarization:** pour contraindre les modèles cosmologiques et la nature de la matière noire et de l'énergie sombre.

**Caractériser la polarisation du CMB a grande échelle:** pour rechercher des ondes gravitationnelles primordiales et mieux comprendre l'inflation cosmique.

Current/upcoming



Future

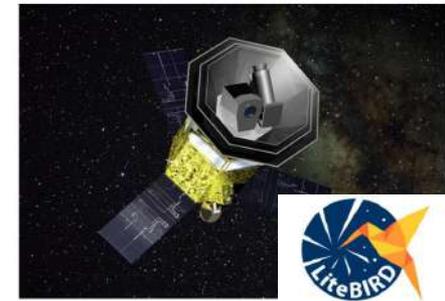
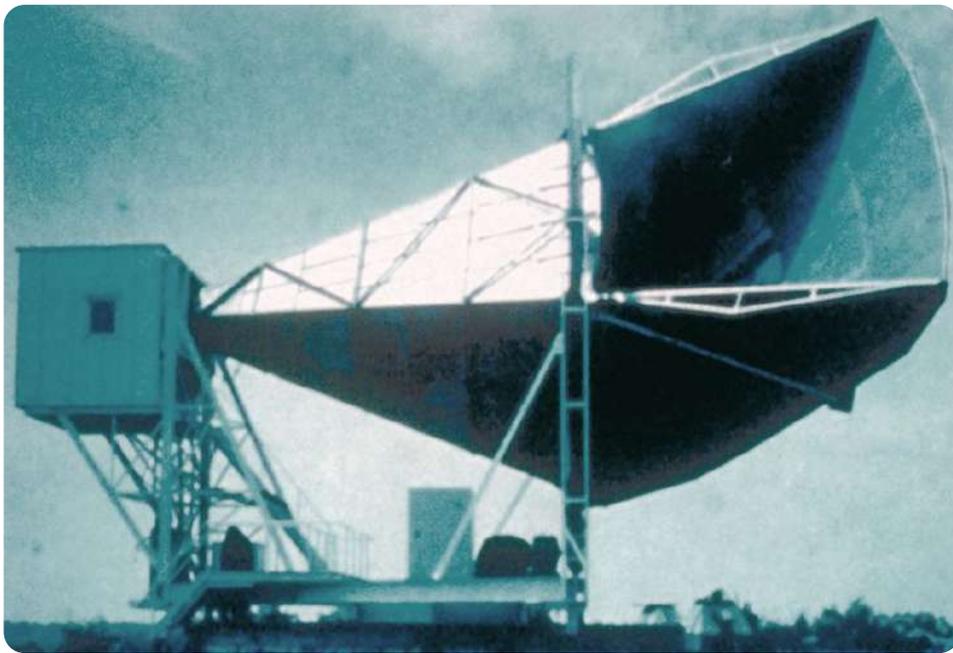


Illustration de satellite LiteBIRD. Source: <https://www.galaxy.jp/1947>





***Quel chemin  
parcouru !!!***

***Et ce n'est  
pas fini !!!***

	Mean	$\sigma$	[%]
$\Omega_b h^2$ Baryon density	0.02237	0.00015	0.7
$\Omega_c h^2$ DM density	0.1200	0.0012	1
$100\theta$ Acoustic scale	1.04092	0.00031	0.03
$\tau$ Reion. Optical depth	0.0544	0.0073	13
$\ln(A_s 10^{10})$ Power Spectrum amplitude	3.044	0.014	0.7
$n_s$ Scalar spectral index	0.9649	0.0042	0.4
$H_0$ Hubble	67.36	0.54	0.8
$\Omega_m$ Matter density	0.3153	0.0073	2.3
$\sigma_8$ Matter perturbation amplitude	0.8111	0.0060	0.7