

# **Vingt minutes dans le Cosmos avec la mission Planck**

LPNHE, Journée des nouveaux  
entrants à l'IN2P3

25 mars 2015

# Lancement à Kourou, le 14 mai 2009

Planck est une mission de l'Agence Spatiale Européenne conçue pour cartographier tout le ciel dans le domaine de longueurs d'ondes du rayonnement de fond à 2.7 K avec une précision permettant de tester les modèles cosmologiques au pour cent

**Kourou, mai 2009**

CENTRE SPATIAL GUYANAIS

***Port spatial de l'Europe  
Europe's Spaceport***



esa

  
cnes

# Mai 2009 - deux satellites scientifiques (Planck et Herschel) sont lancés depuis Kourou par la même Ariane 5

*Cet événement marque l'aboutissement de plus de dix ans de travail d'équipes de plusieurs centaines de personnes (et le début de plusieurs années de prises de données...)*



Cette mission est bâtie autour de deux instruments scientifiques LFI et HFI, dirigés respectivement par l'Italie (P.I. R. Mandolesi – CNR Bologna) et la France (P.I. J.-L. Puget – IAS), avec une forte contribution américaine financée par la NASA.

**esa** **planck**

Logos of partner institutions: CNES, ASI (agenzia spaziale italiana), NASA, CNRS, DTU Space National Space Institute, Science & Technology Facilities Council, CSIC, IAS orsay, IAP, INAF, INAF - IASF BO, INAF - IASF BO ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA, INAF - IASF BO ISTITUTO DI ASTROFISICA SPAZIALE E FISICA COSMICA DI BOLOGNA, UK SPACE AGENCY, WAX-PLANCK-GESellschaft, CITA-ICAT, IN2P3, IPAC (Infrared Processing and Analysis Center), HELSINKI INSTITUTE OF PHYSICS, IFCG, Imperial College London, NEEL Institut, IPAG, ISDC, JPL, LAL (LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE LINÉAIRE), Observatoire de Paris - LERMA, LPSC Grenoble, MilliLab, NUI MAYNOOTH, SAPIENZA, Rutherford Appleton Laboratory, UBC, UC, UCSB, SISSA, ALMA, US, eesa, UNIVERSITY OF HELSINKI, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO, UNIVERSITÀ DI TORINO, UNIVERSITÀ DE GENÈVE, UNIVERSITY OF TORONTO, UNIVERSITÉ DE PARIS-SUD XI, TIT, asdc.

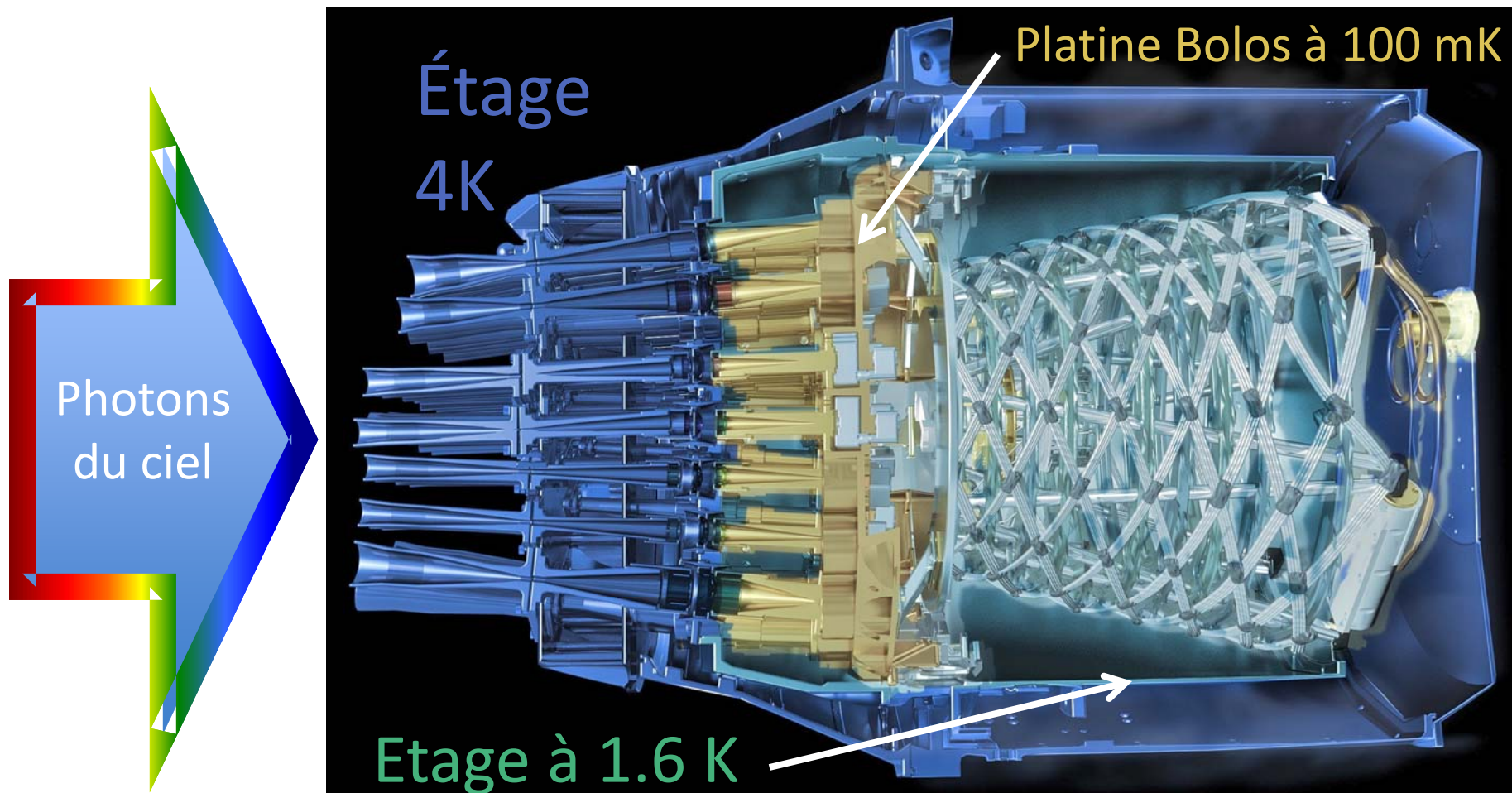
**Country List:**

- Austria
- Belgium
- Denmark
- Finland
- France
- Germany
- Ireland
- Italy
- Netherlands
- Norway
- Portugal
- Spain
- United Kingdom
- Sweden
- Switzerland
- United States

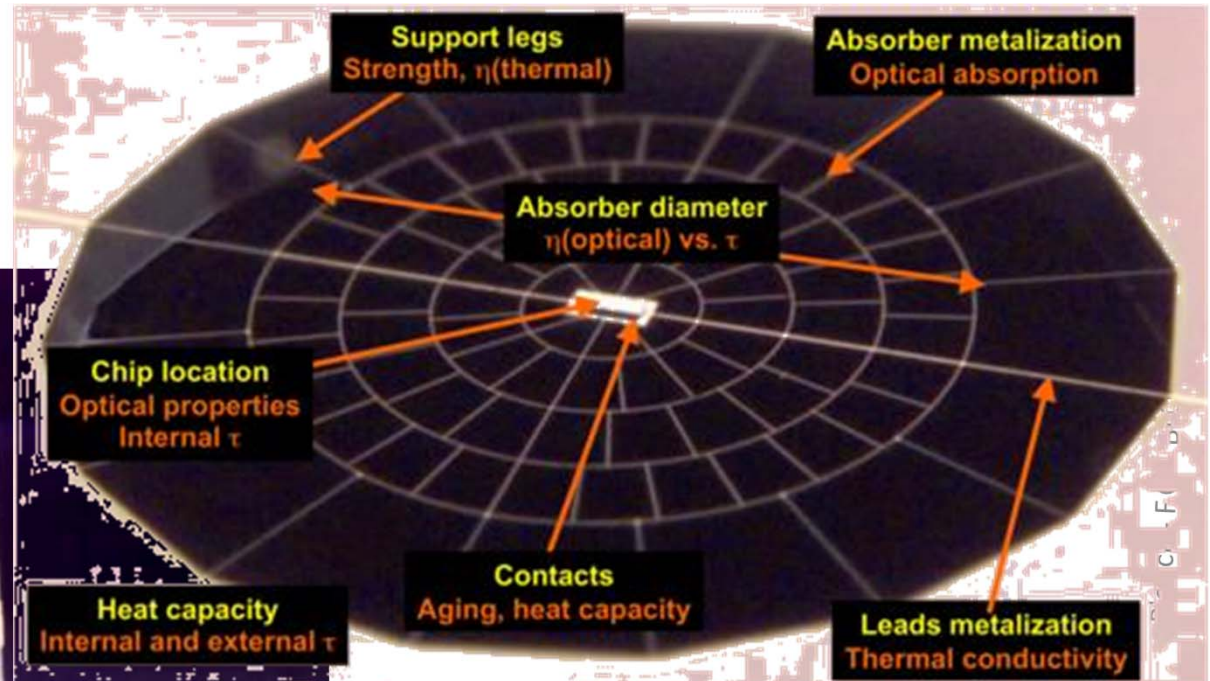
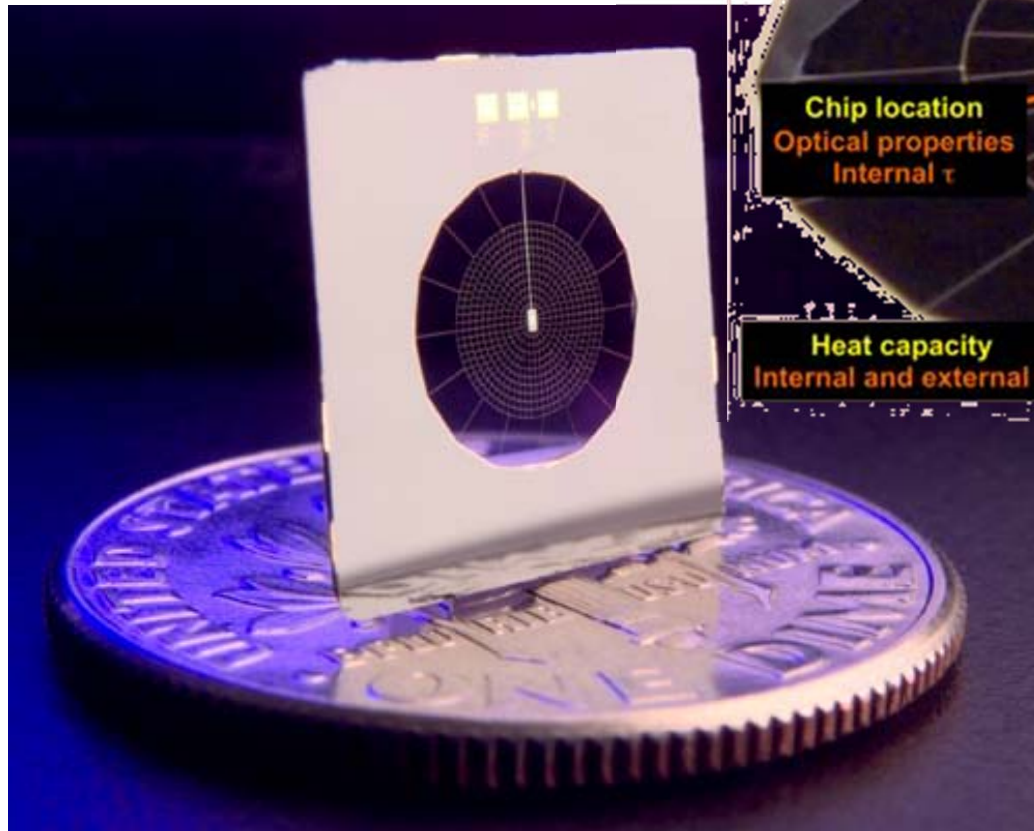
# Echelle (de Planck)



# L'instrument à hautes fréquences (100 à 1000 GHz)



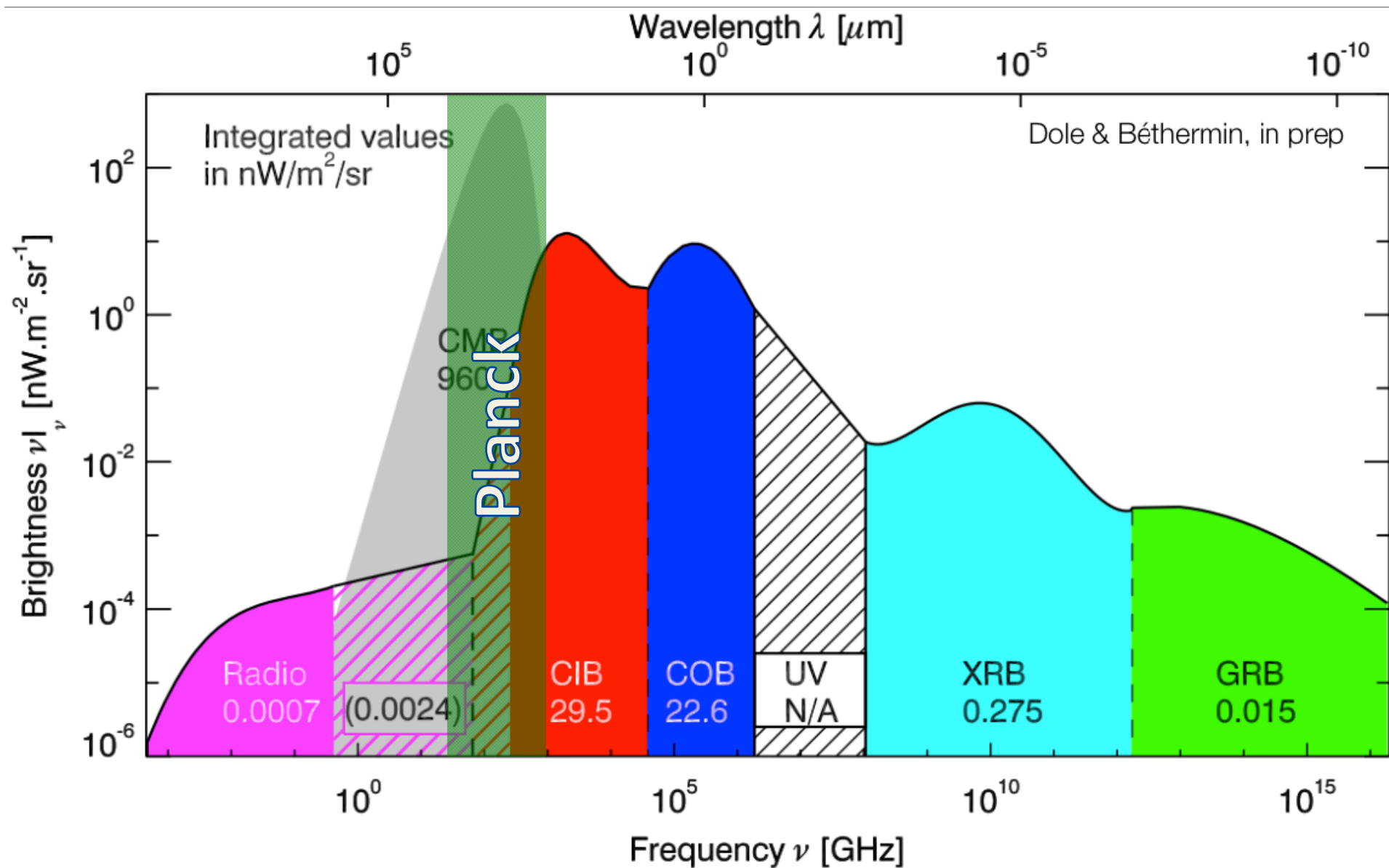
# Les bolomètres de HFI (JPL-Caltech) fonctionnent à .1 K



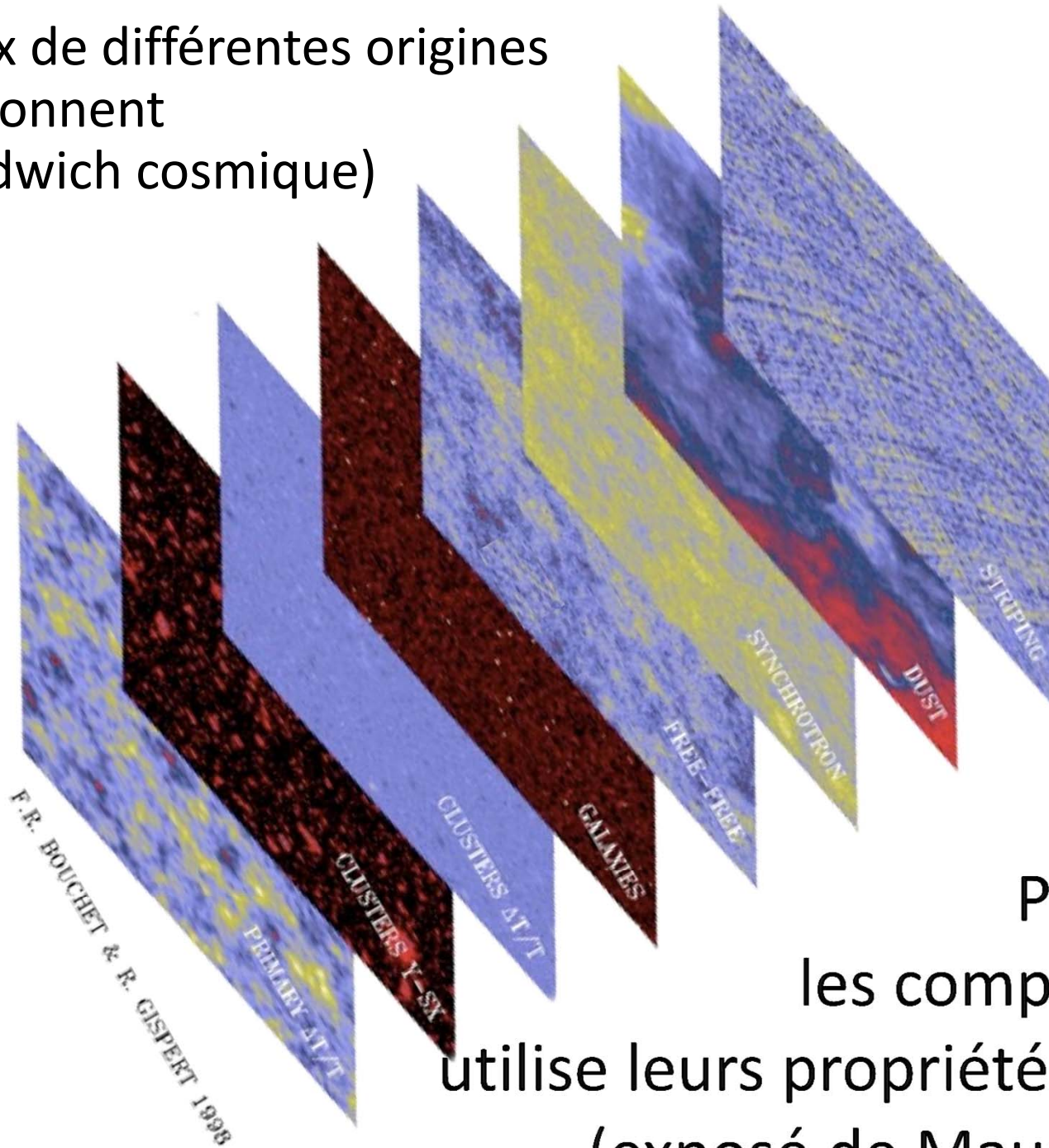
<http://hfi.planck.fr/article227.html>



# Toute la lumière (presque tous les photons viennent du CMB)

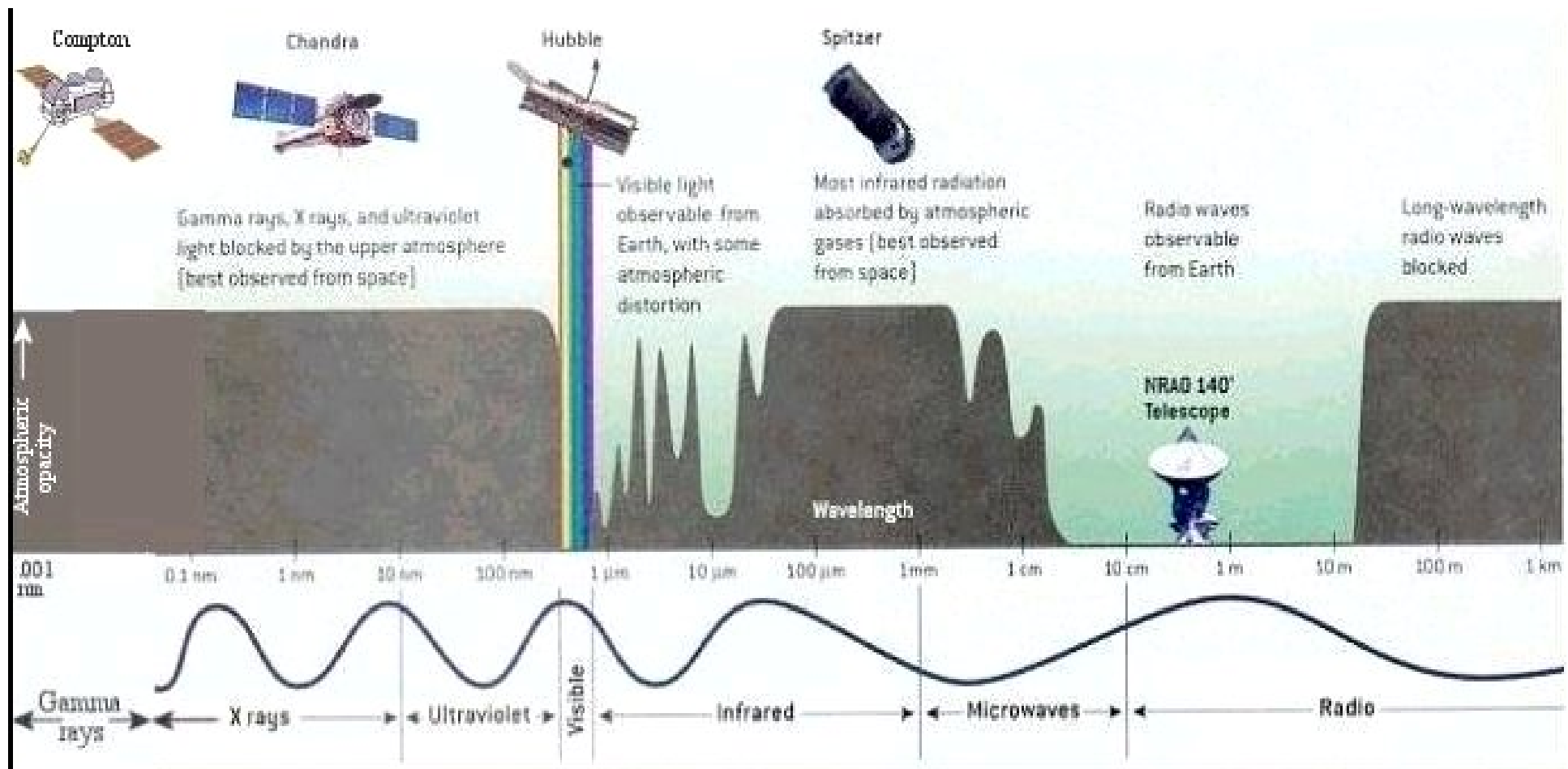
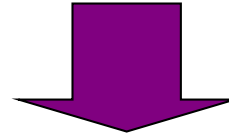


Des flux de différentes origines  
s'additionnent  
(le sandwich cosmique)



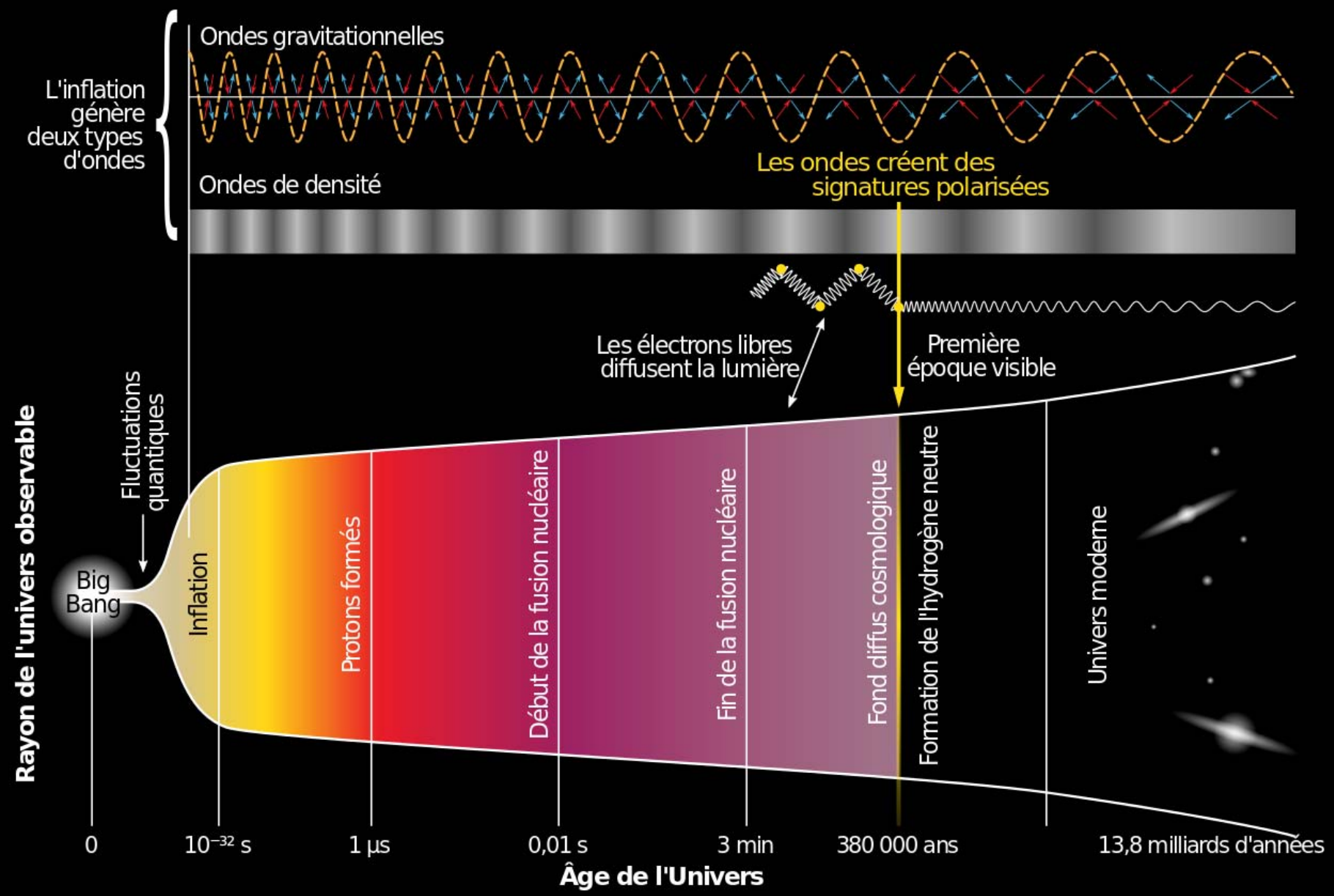
Pour séparer  
les composantes, on  
utilise leurs propriétés spectrales  
(exposé de Maude Lejeune)

# Pourquoi aller dans l'espace ?



# **LA COSMOLOGIE**

# Histoire de l'Univers



# La lumière se déplace à vitesse finie :

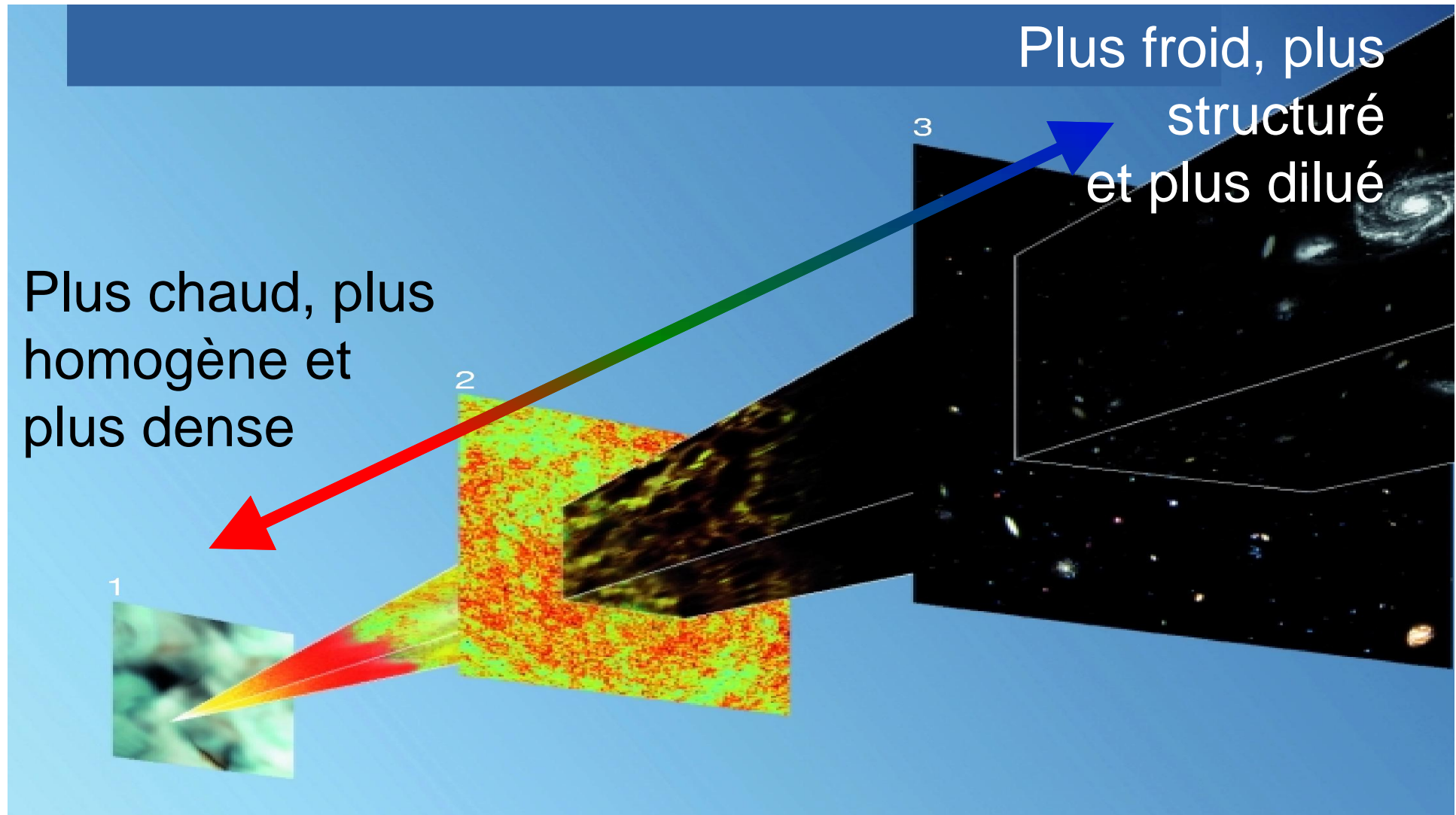
*Observer loin, c'est voir  
dans le passé*

- ★ De vous à moi : 10 ns
- ★ De la Terre à la Lune : 1 s
- ★ Soleil - Terre : 8 mn
- ★ Soleil - Pluton : 5 heures
- ★ Soleil - Proxima du Centaure : 4 ans 2 mois 20 jours
- ★ Soleil - Centre Galactique : 26000 ans
- ★ Soleil - galaxie d'Andromède : 2,5 millions d'années
- ★ Soleil – galaxies les plus lointaines : > 10 milliards d'années
- ★ « Emission du Rayonnement de Fond Cosmologique » :  
13,3 milliards d'années

# La Cosmologie étudie l'Univers au cours de son histoire. Elle manipule entre autres les notions suivantes

- Distances entre les objets qui le composent
- Contraste de densité – corrélation spatiale des objets
- Température « ambiante »
- Proportion des diverses composantes
  - Matière bougeant lentement en comparaison de la lumière
    - Ordinaire (baryonique = atomes) et neutrino le plus lourd
    - Sombre (particules hypothétiques ou ?)
  - Composantes relativistes
    - Ondes électromagnétiques (photons)
    - Neutrinos légers
    - Rayons cosmiques
    - Autres ?
  - Energie sombre
  - Autres ?

# Densité, homogénéité et température en fonction du temps cosmologique





# Quelques sondes cosmologiques

(toutes impliquent des équipes de l'in2p3)

Rayonnement de  
fond cosmologique

2

1  
Nucleosynthèse  
primordiale

3  
Fond  
Cosmique  
Infrarouge

Supernovæ Ia  
(SNLS, DES...)

Amas de  
galaxies

Oscillations  
Baryoniques  
(BOSS)

Inhomogénéités de l'indice  
optique de l'Univers  
(cisaillement gravitationnel

— Euclid-LSST)

La sonde très précise qui permet à la fois de remonter à *l'inflation* et de tester les modèles jusqu'à des redshifts intermédiaires

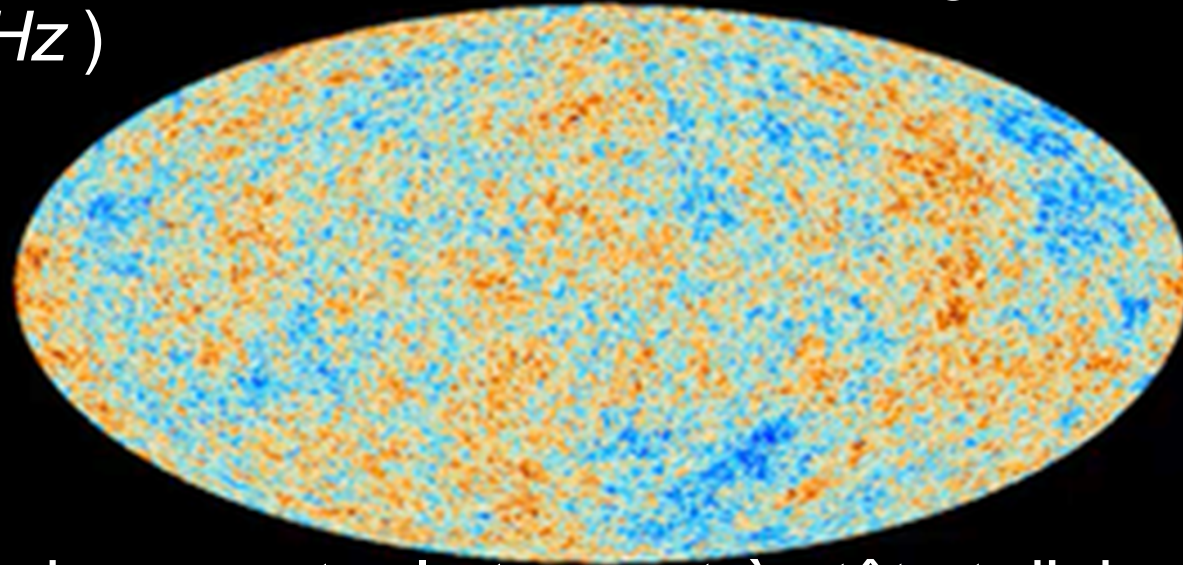
# **LE RAYONNEMENT DE FOND COSMOLOGIQUE**

Avant 380000 ans



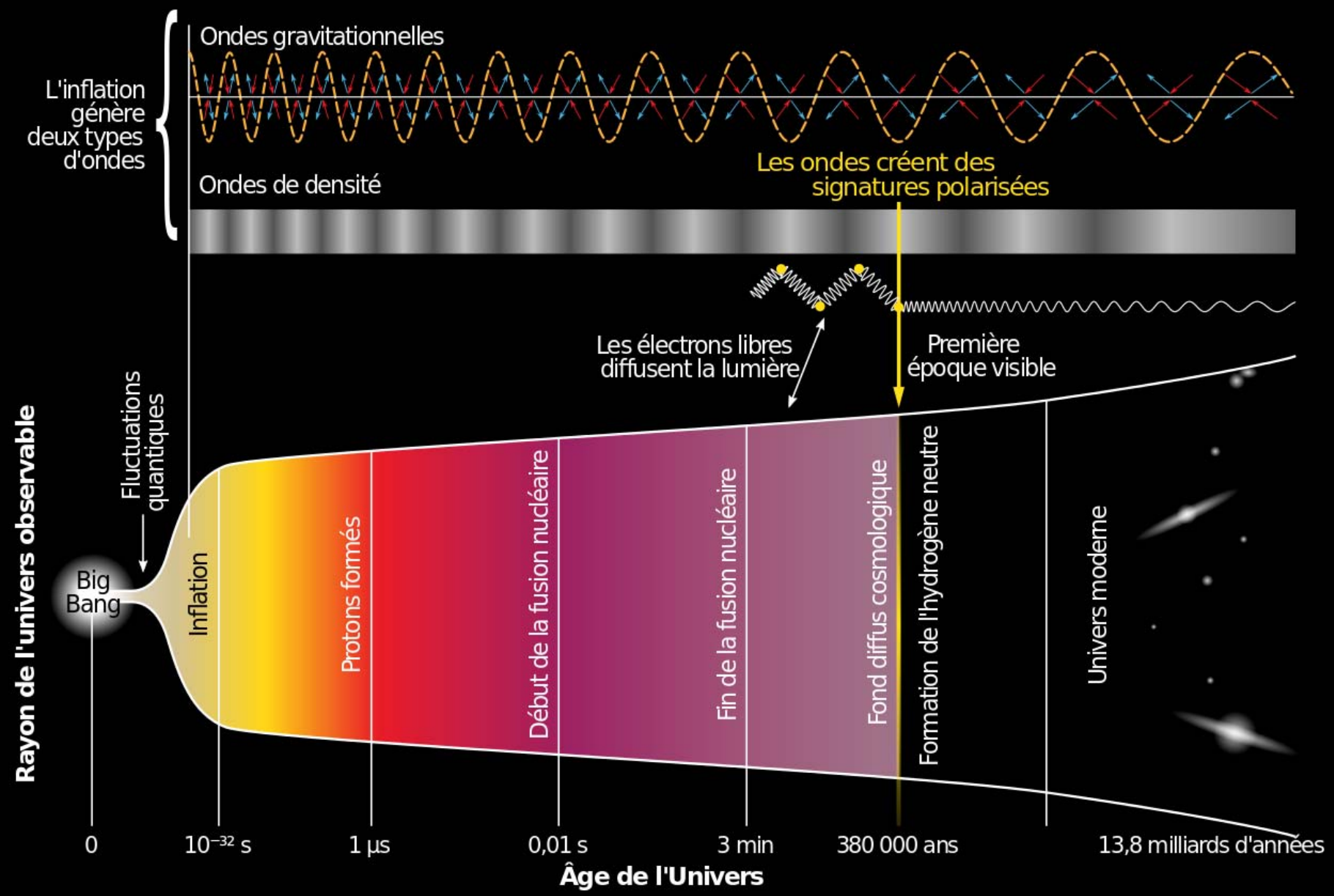
# Le rayonnement fossile

- Emis à l'époque où l'Univers était 1000 fois plus chaud qu'aujourd'hui
- Visible depuis l'espace autour de  $2 \text{ mm}$  de longueur d'onde (  $150 \text{ GHz}$  )



- Permet à la fois de remonter le temps très tôt et d'observer tous les phénomènes qui l'affectent le long de son trajet vers nous = C'est un outil unique pour comprendre l'Univers

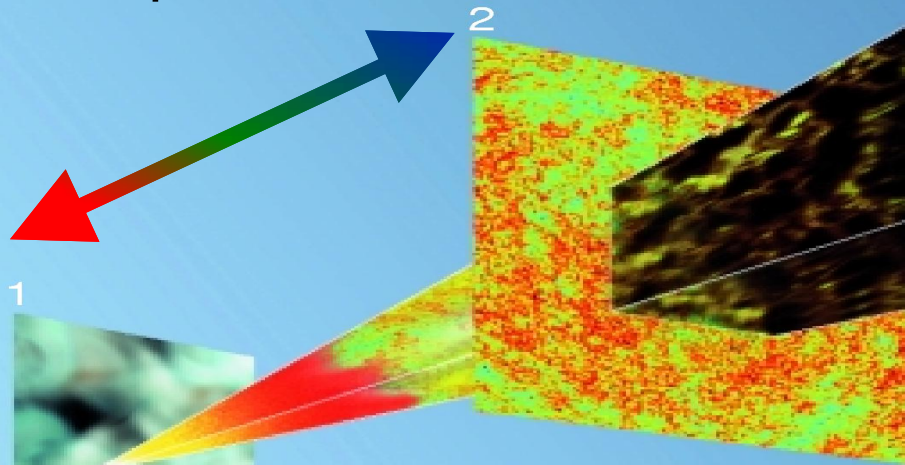
# Histoire de l'Univers



# Le CMB en deux temps trois mouvements

$T \sim 3000 \text{ K}$  ( $z \sim 1100$ ),  
les photons n'ont plus  
assez d'énergie pour  
ioniser les atomes  
d'Hydrogène

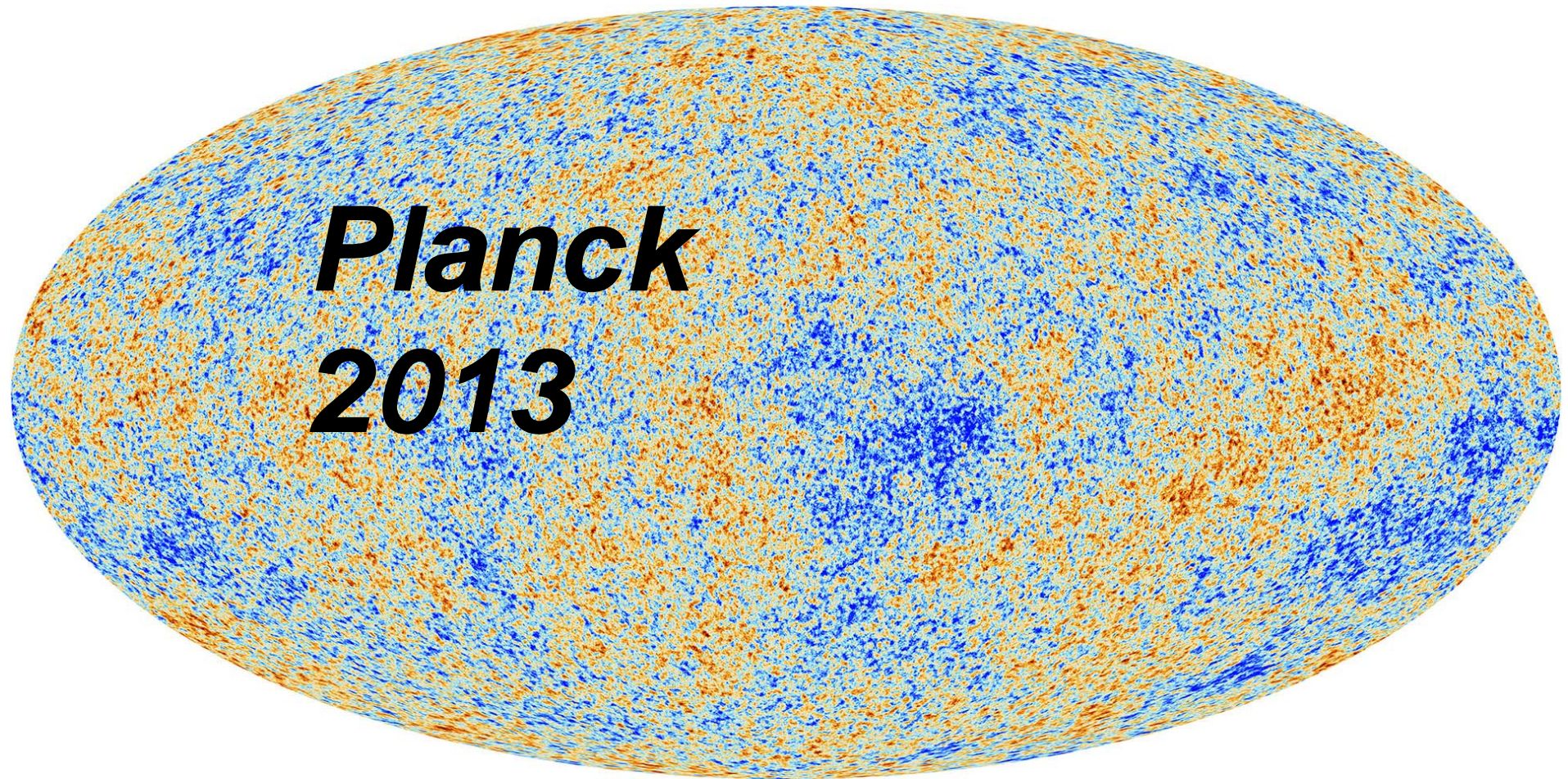
Plasma, photons  
piégés et résistant  
aux compressions



Production des  
photons en fin

On peut voir aujourd'hui  
la surface de dernière  
diffusion

# Les expériences CMB en mesurent la carte d'anisotropie de température



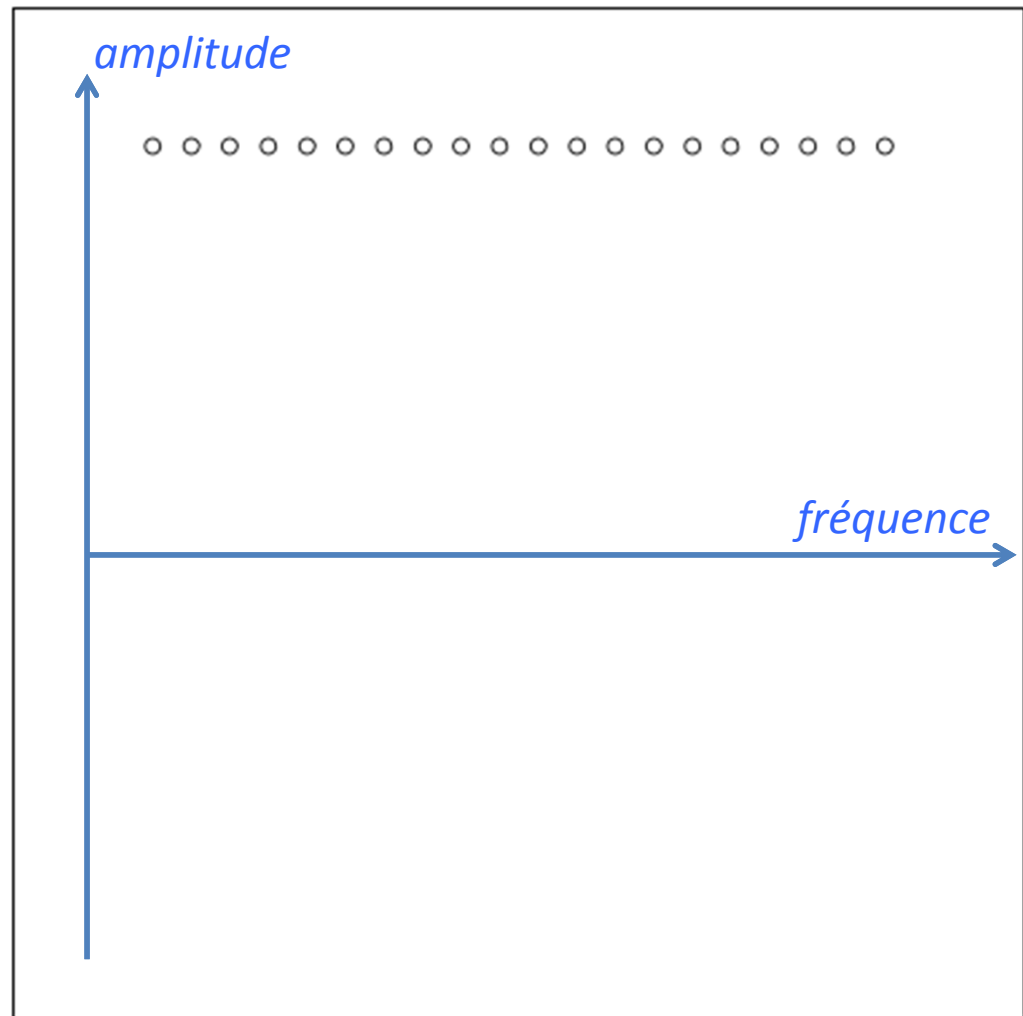
-500  500  $\mu\text{K}_{\text{CMB}}$

$1 \sigma = 110 \mu\text{K}$

consort.

SMITH ET AL. (2013)

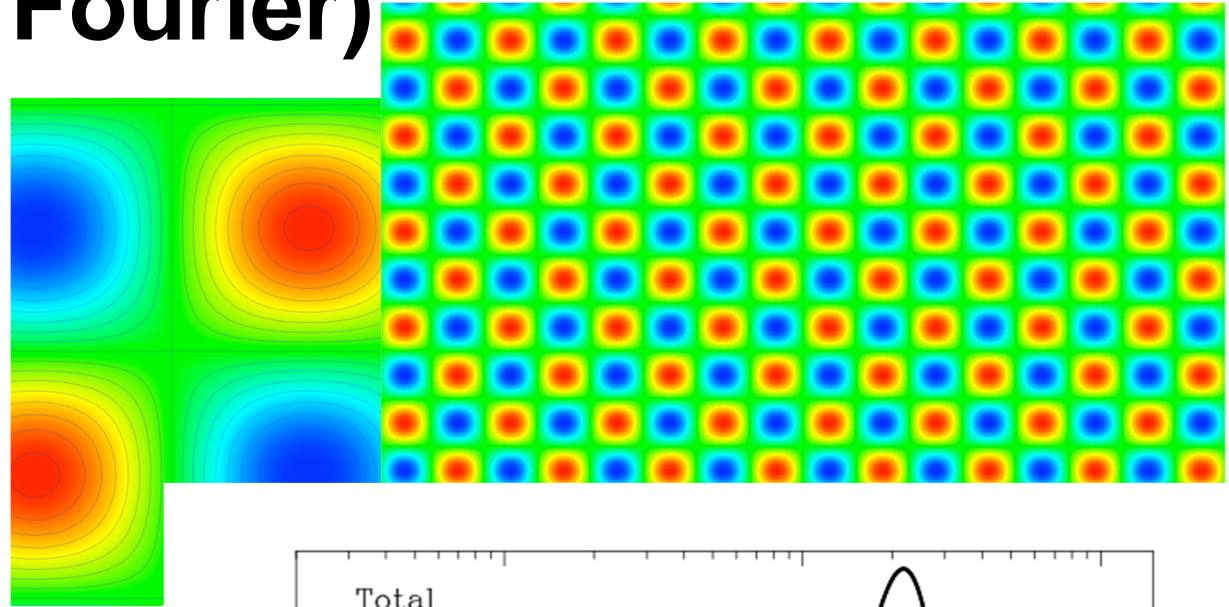
Evolution des  
perturbations de  
densité entre  
 $t=0$   
et  
 $t=t_{\text{rec}}$



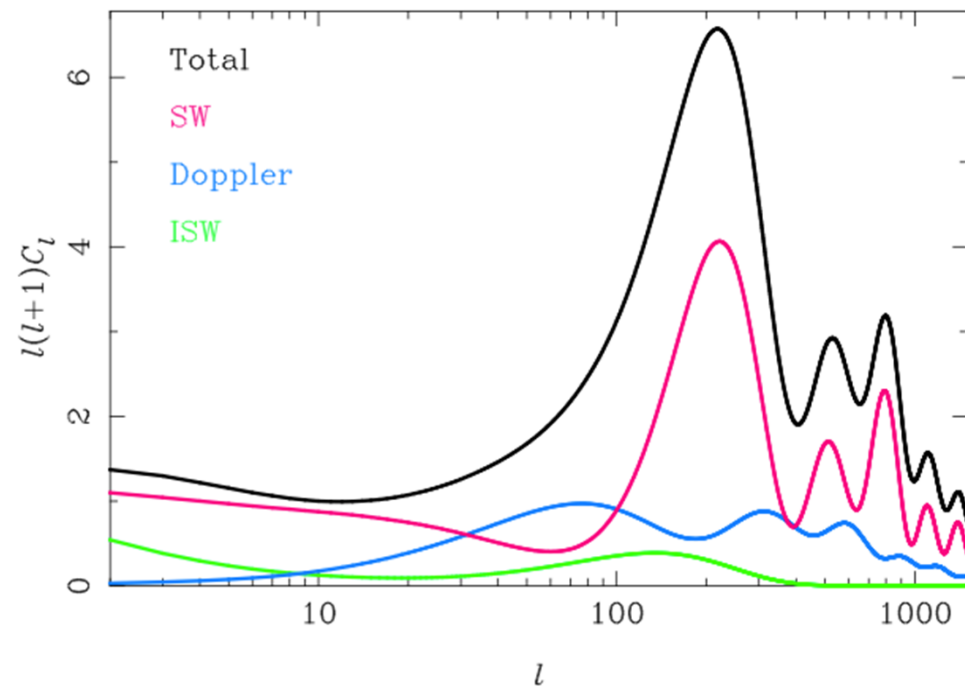


# Linéarité : on analyse en décomposant en modes (de Fourier)

On calcule d'abord ce qui se passe dans l'espace à 3 dimensions



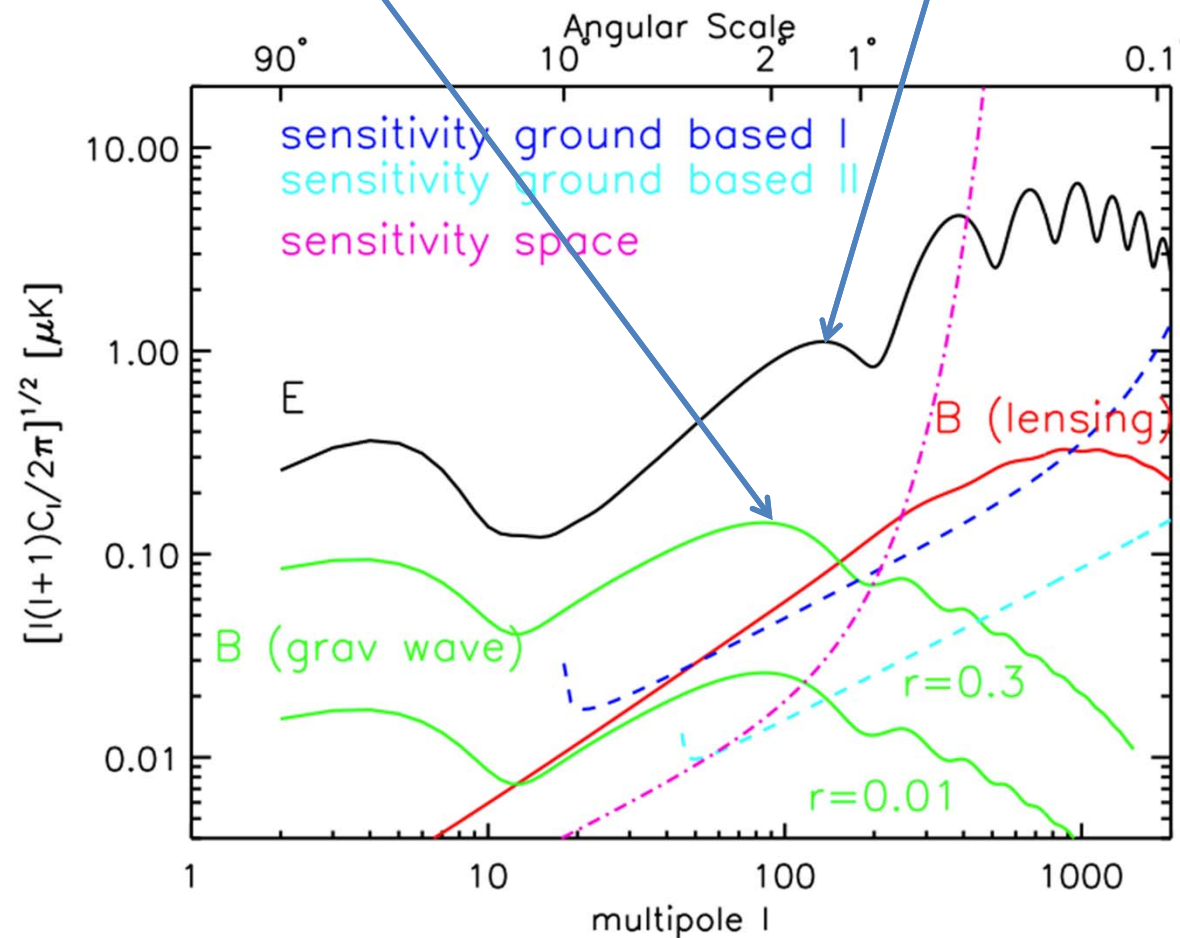
On en déduit le spectre de puissance de la décomposition en harmoniques sphériques de la carte de température



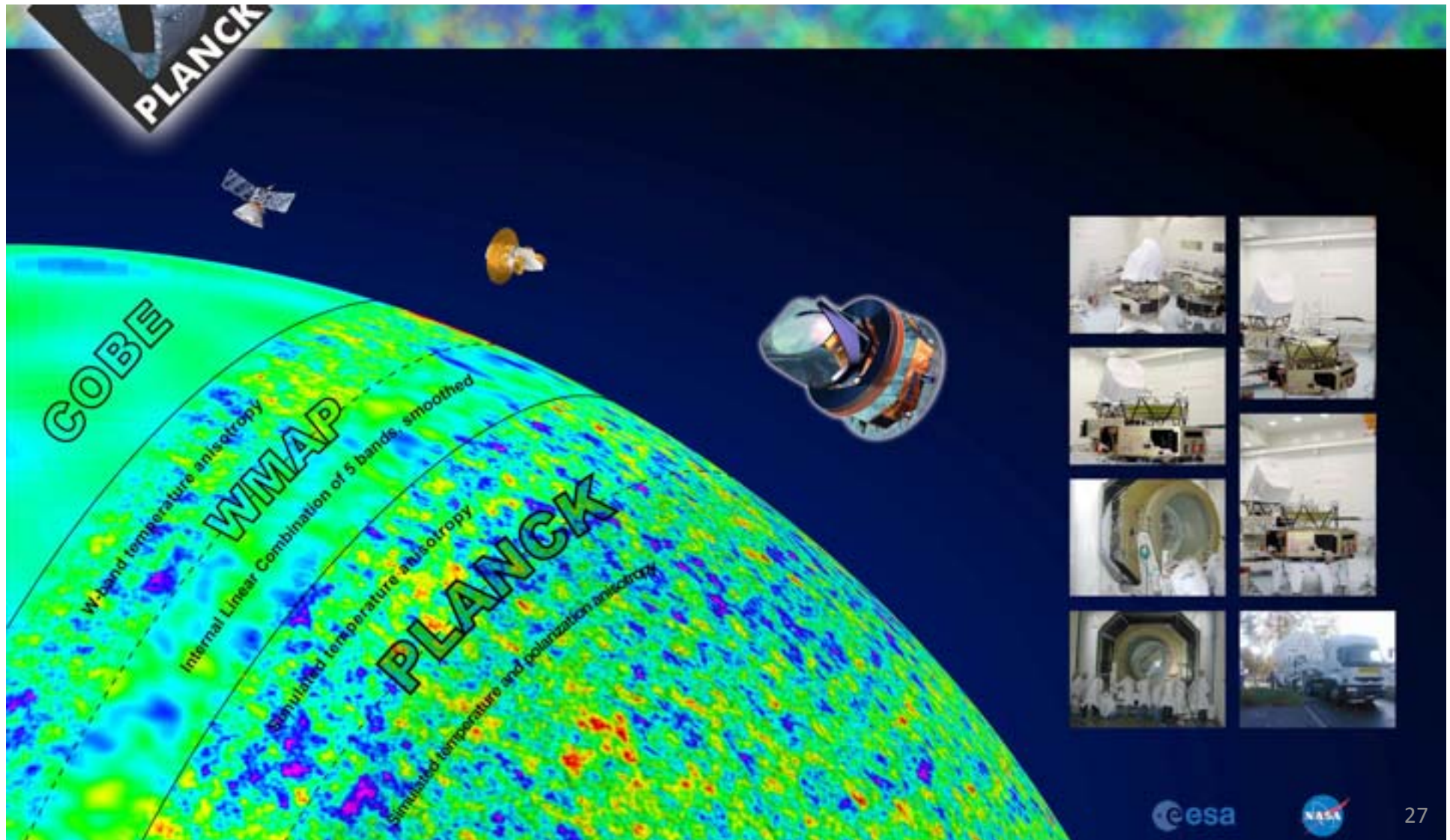
# Prédictions aussi d'effets sur la polarisation linéaire du rayonnement de fond

Ondes gravitationnelles =  
oscillations de l'espace-temps  
à  $v=c$

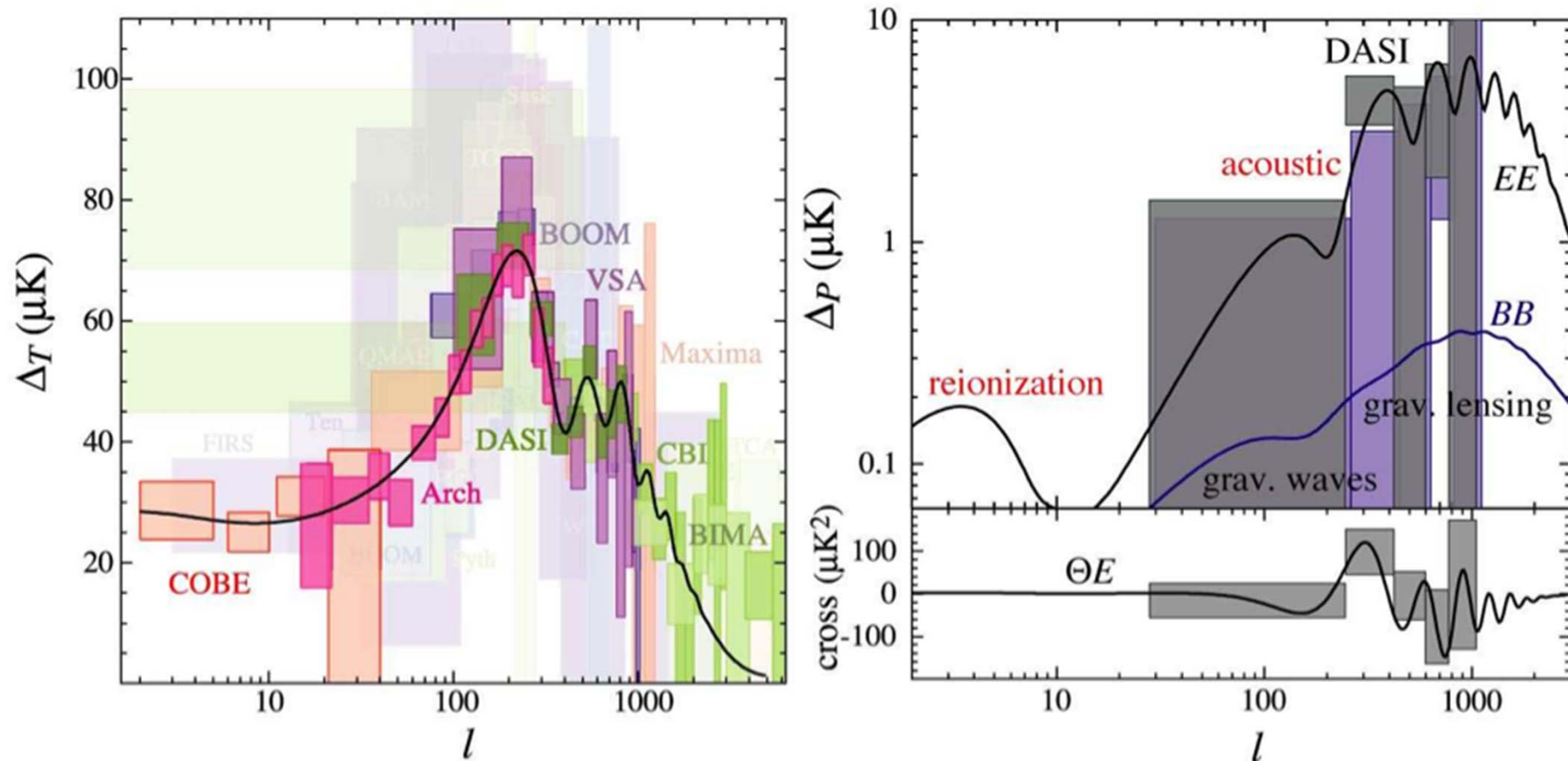
Ondes de pression dans le  
plasma à  $v=c/\sqrt{3}$



# 3 générations de missions spatiales



# Les mesures

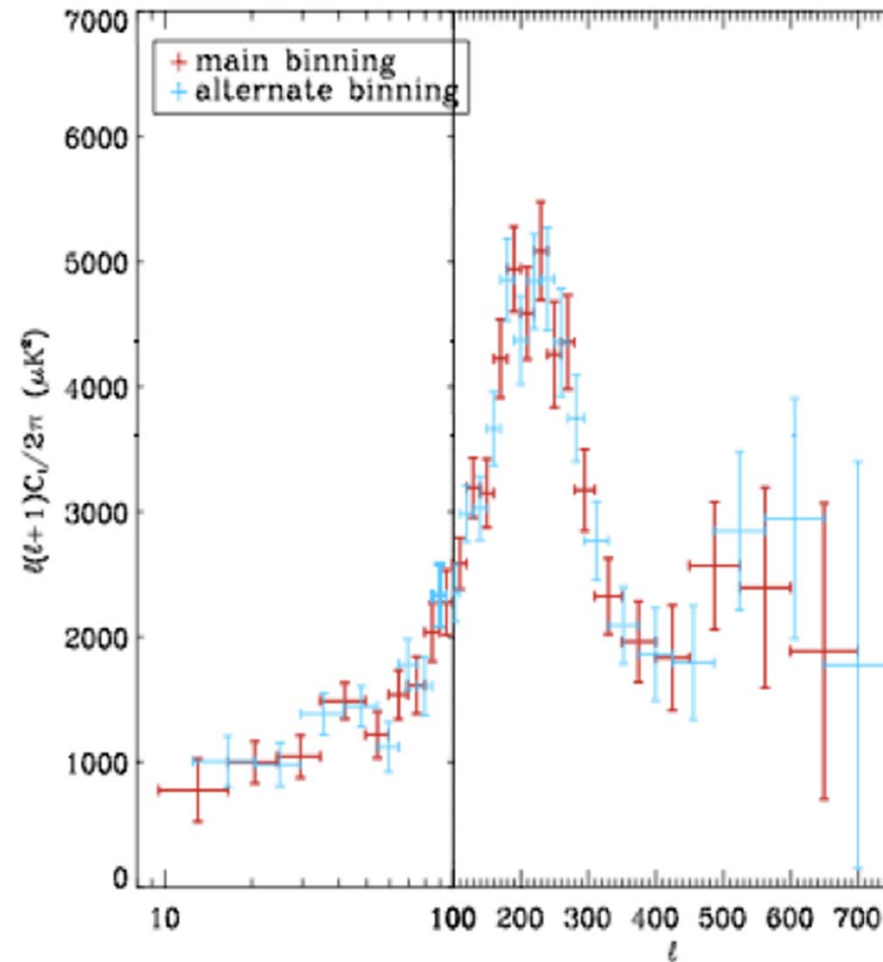


**FIGURE 1.** Power spectra data plotted as the rms contribution per logarithmic interval  $[l(l+1)C_l/2\pi]^{1/2}$  with error boxes representing  $1\sigma$  error bars and approximate multipole bandwidth. Overplotted is a scale-invariant, flat cosmological model with  $\Omega_m = 1/3$ ,  $\Omega_\Lambda = 2/3$ ,  $h = 0.7$ ,  $\Omega_b h^2 = 0.02$ , reionization redshift  $z_i = 7$ , and an inflationary energy scale of  $E_i = 2.2 \times 10^{16}$  GeV.

D'abord Cobe  $l < 20$  donne le niveau du plateau à grande échelle -> inflation

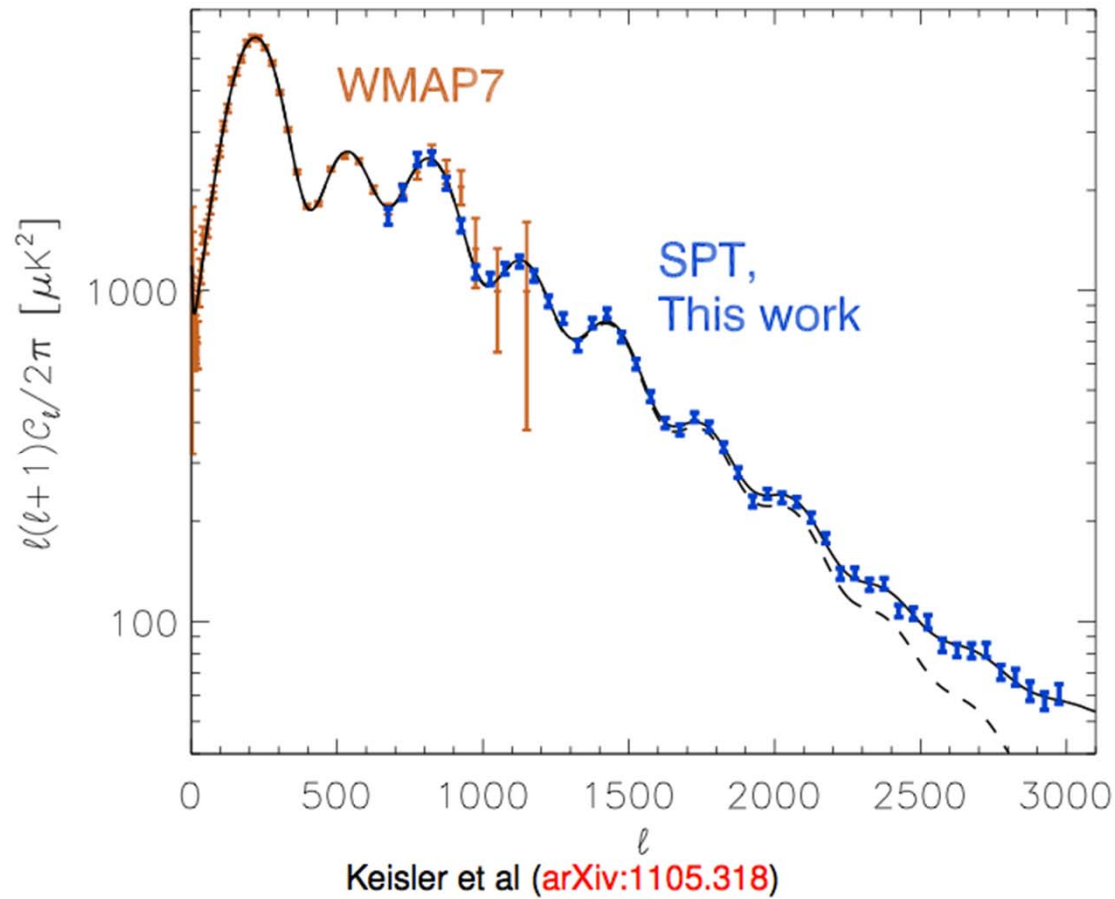
Puis le ballon Boomerang mesure la position du premier pic -> espace plat = inflation

# Les mesures (suite)



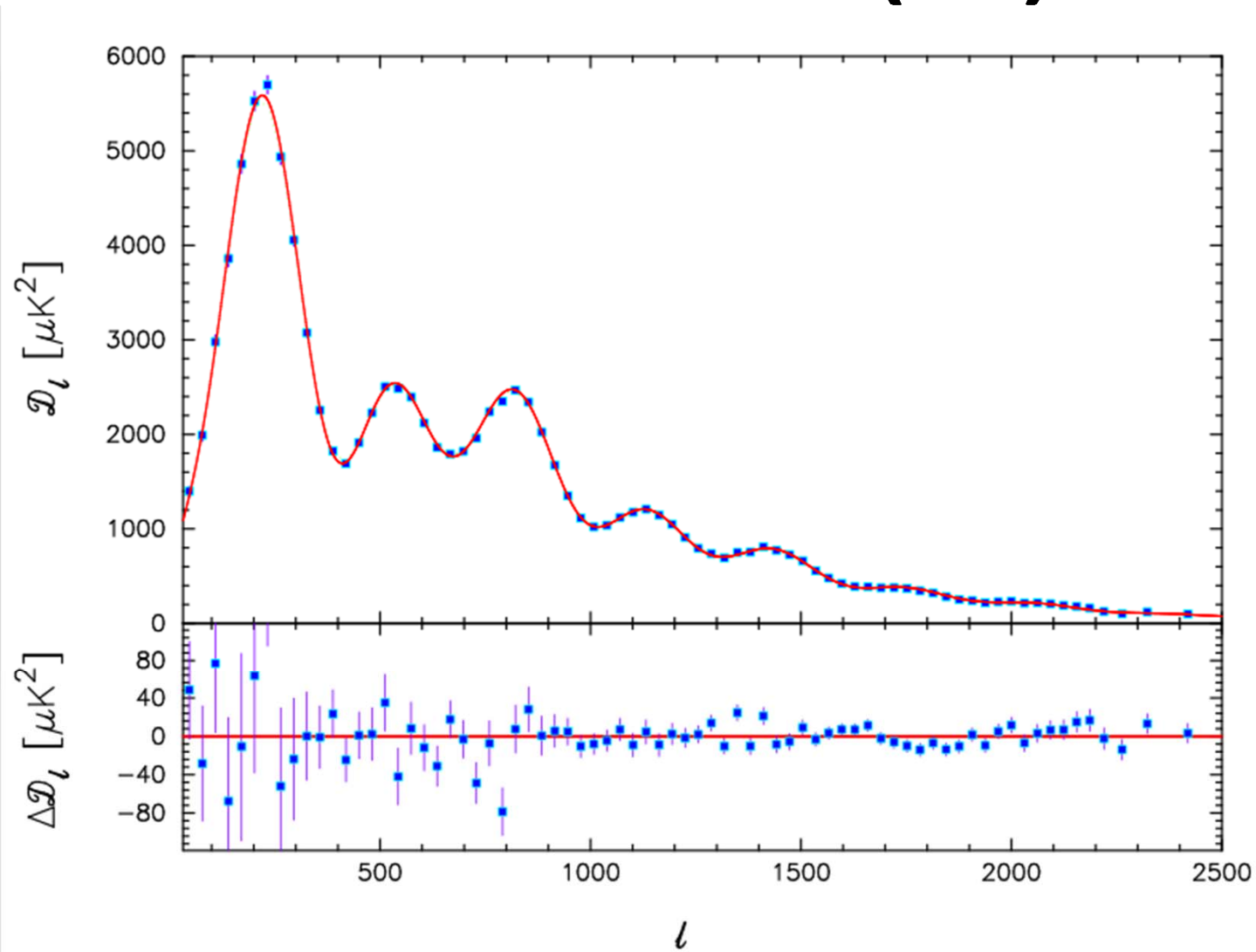
En 2002, juste avant les résultats de Wmap, le ballon « européen » Archeops fait la liaison entre les échelles de Cobe et celles de Boomerang

# Les mesures (encore)



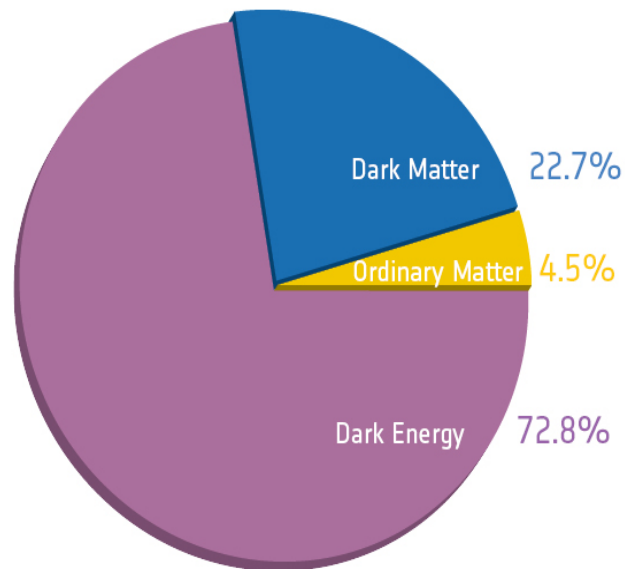
En 2011, 7 ans de données de Wmap et un télescope au Pôle-Sud explorent des échelles complémentaires

# Les mesures (fin)

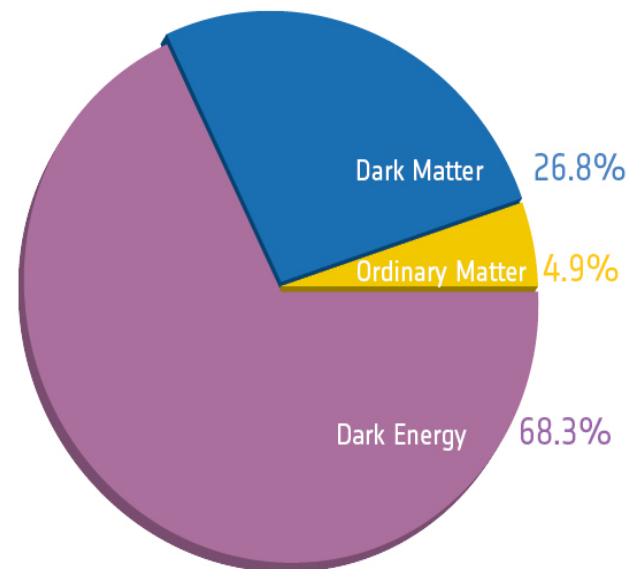


En 2013, 1 an de données de Planck couvre précisément l'ensemble des échelles (et corrige l'inter-calibration Wmap-SPT)

# Cosmic pie recipe refined



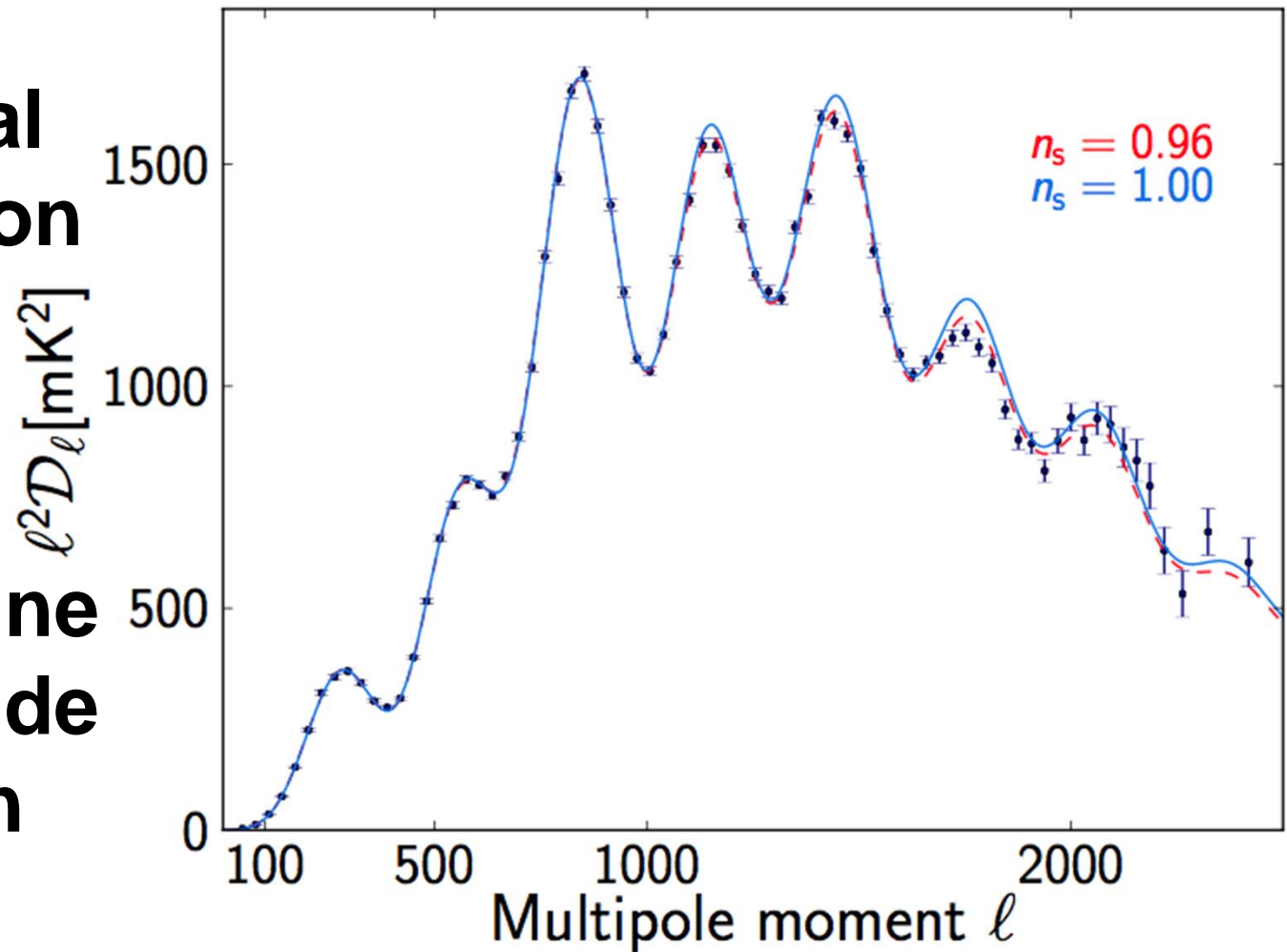
Before Planck



After Planck



**Primordial  
perturbations  
scalar  
index  
 $n_s < 1$ ,  
confirme une  
prédiction de  
l'inflation**



**Fig. 22.** The *Planck* power spectrum of Fig. 10 plotted as  $\ell^2 \mathcal{D}_\ell$  against multipole, compared to the best-fit base  $\Lambda$ CDM model with  $n_s = 0.96$  (red dashed line). The best-fit base  $\Lambda$ CDM model with  $n_s$  constrained to unity is shown by the blue line.

# Qu'y a-t-il dans l'Univers aujourd'hui ?

## Ordres de grandeur

- Une densité totale équivalente à 5 protons/m<sup>3</sup> (en moyenne)
- Mais seulement 4% sont des protons (et des neutrons)
  - 1 neutron pour 7 protons
  - Presque tous les neutrons dans des noyaux d'Helium = 2p+2n
  - Presque tout le reste sous forme d'Hydrogène = 1 p
  - Un peu de poussière (nous...)
- Pour chaque nucléon, il y a environ 2 milliards de photons (et 3 milliards de neutrinos) ! Ces proportions ont très peu changé « depuis le début », tous les nucléons qui nous composent ont été produits pendant le big-bang (mais les noyaux eux nous viennent des étoiles)



C'est aussi des idées et des hommes

# PLANCK : UNE MISSION SCIENTIFIQUE

# Premiers concepts de l'instrument hautes fréquences (J.-M. Lamarre)

4

Plan local Primaire  $\phi_{diff} = 1.5 AN$   
 $\phi_{diff} = 1.2 \times 2.4 \times 1.6 = 6.6 mm$

5

Estimation des sensibilités - Explorateur sub mm

Transmission optique froide  $\tau = 0.3$   $T_{opt} = 0.3 K$   
 usage  $T = 70 K$   $\epsilon = 10^{-2}$   
 $A_{max} = A_{max}^2$  pour chaque bande (1200, 1800)  
 champs de  $(20^\circ/15^\circ/10^\circ/7^\circ)$  pour  $\phi_{diff} = 50 cm$   
 ou  $(28^\circ/21^\circ/14^\circ/10^\circ)$  pour  $\phi_{diff} = 36 cm$

$\lambda$	$W_{ph}$	$NEP_{ph}$	$W_{ph}$	$NEP_{ph}$	$W_{ph}$	$NEP_{ph}$
18	1.6E-13	7.3 E-18	4. E-13	1. E-17	4. E-13	8.8 E-18
17	1.1 E-12	2.2 E-17	7.8 E-13	1.5 E-17	4 E-13	1 E-17
17	1.3 E-12	2.3 E-17	1.1 E-13	1.2 E-17	8 E-13	1.35 E-17
16		17		2.0		2.0

$H_1^2 = 24 \mu K (ms)$   $H_2^2 = 28 \mu K (ms)$   $H_3^2 = 39 \mu K (ms)$

$\lambda$	$W_{ph}$	$NEP_{ph}$	$W_{ph}$	$NEP_{ph}$	$W_{ph}$	$NEP_{ph}$
36	50 $\mu K$	16	2.0 $\mu K$	1.4 $\mu K$	2.4 $\mu K$	2.3 $\mu K$
18	2.8	1.8	3.3	6.3	1.1	8.3
5	3.6	5.2	2.6	3.9	3.4	5.2
6	60	40	100	70	200	150

meles art un  $NEP \leq 0.3 NEP_{ph}$  (de 5 à 10  $10^{-17} W m^{-2} Hz^{-1/2}$ )  
 différentielle: sensibilité réelle par paire de bolomètres  
 $\eta_{ind} = 100\%$   
 $\sigma_{diff} = \sqrt{2} \sigma_{ind}$   
 $\sigma_{diff} = 6.10^7 \pi \frac{\phi_{diff}}{D} = \frac{5.10^7 \phi_{diff}}{D}$   
 temps d'intégration par champ  $(28^\circ, 26^\circ, 15^\circ, 10^\circ, 7^\circ)$   
 $\rightarrow 9.55, 13.5, 7.6, 3.6, 1.7$   
 Facteur d'amélioration 93, 16.4, 12.3, 8, 6

Version  $\phi_{diff} = 36 cm$   
 $\phi_{diff} = 36 cm$

# L'auteur de la dilution spatialisable (A. Benoit)



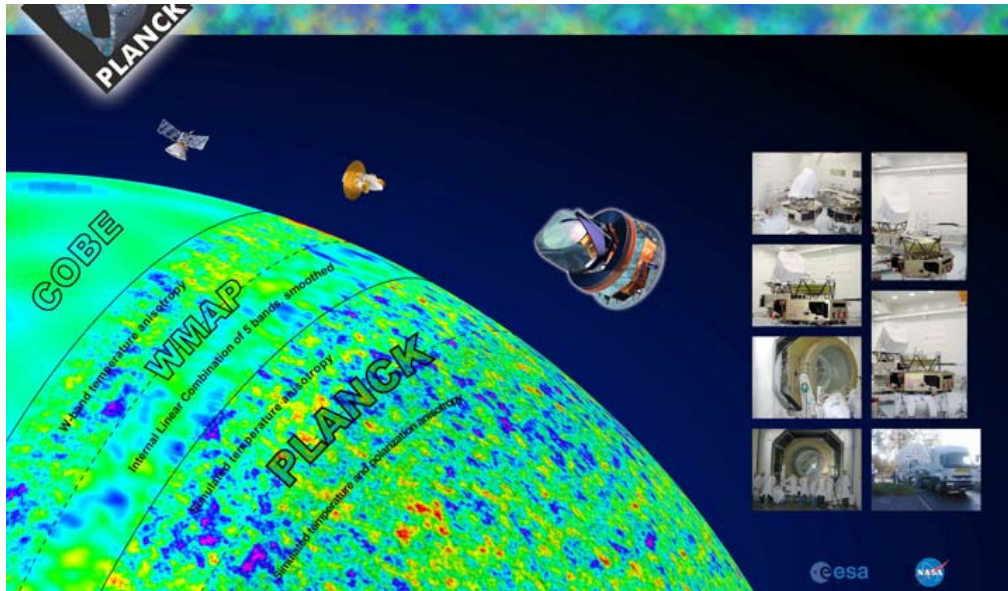
# Planck à l'IN2P3 (APC, LAL, LPSC)

- Contributions importantes à l'instrument embarqué (technologie spatiale)
  - calculateurs de contrôle de l'instrument
  - mécanique, électronique, logiciel, tests d'environnement, assurance produit
- Contributions importantes à l'étalonnage au sol
- Responsabilité de la fabrication des cartes publiées
- Intérêt pour la cosmologie (plutôt que pour la physique galactique)
  - approche fréquentiste de l'estimation des paramètres cosmologiques
  - responsabilité papier inflation
  - apport décisif sur la maîtrise des effets systématiques instrumentaux

# Développement de compétences in2p3

- Pilotage de systèmes embarqués (électronique et logiciels) constitution d'un pôle de compétences entre APC-LAL-LPSC
- R & D sur matrices de bolomètres (mm) APC-LPSC
- pôle de compétences en algorithmique, traitement de données et calcul parallèle APC-LAL-LPSC

# Le futur du CMB à l'IN2P3



## distorsions spectrales

- permettraient de tester les processus jusqu'à  $z \sim 1000000$

Encore un an ou deux de publications Planck

## Ondes gravitationnelles primordiales

*sol et espace*

- dernière prédiction de l'inflation à valider
- mission M5 de l'ESA
- projet Qubic en Antarctique
- ...



# **Merci à tous**

et en particulier aux organisateurs de la journée pour l'invitation...

