

la nuit n'est pas noire ? rayonnements cosmologique et extragalactique

1. nuit noire et paradoxe d'Olbers
2. à quoi ressemble la nuit ?
3. le fond cosmologique
4. le fond extragalactique
5. résumé des connaissances et des grandes questions
6. l'apport des satellites Planck et Herschel

Hervé Dole

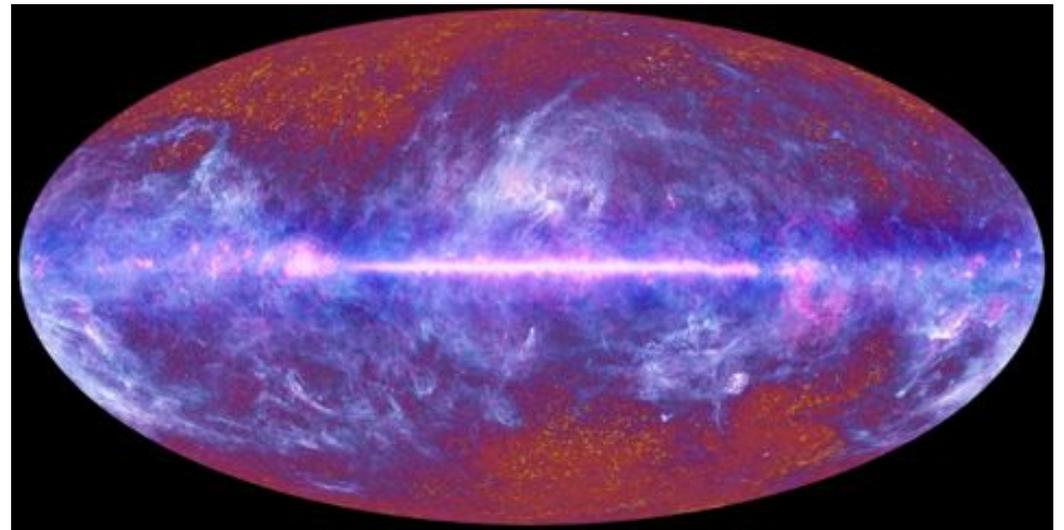
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay
Université Paris-Sud 11 et CNRS
Institut Universitaire de France
<http://www.ias.u-psud.fr/dole>



durant cette matinée, nous allons...

- comprendre pourquoi la nuit est noire...
- ... mais pas si noire que ça en fait

- comprendre pourquoi étudier les rayonnements dans l'Univers nous renseigne sur son histoire



plan

- pourquoi la nuit semble noire, et le paradoxe d'Olbers
- à quoi ressemble la nuit exactement ?
- le plus **intense**: le rayonnement **cosmologique**
 - histoire de l'Univers jeune
- le plus **inattendu**: le rayonnement **extragalactique**
 - histoire de la formation des galaxies
- résumé des connaissances et des grandes questions
- l'apport de **Planck** et d'**Herschel**

1. pourquoi la nuit semble noire,
et le paradoxe d'Olbers

1. la nuit ...



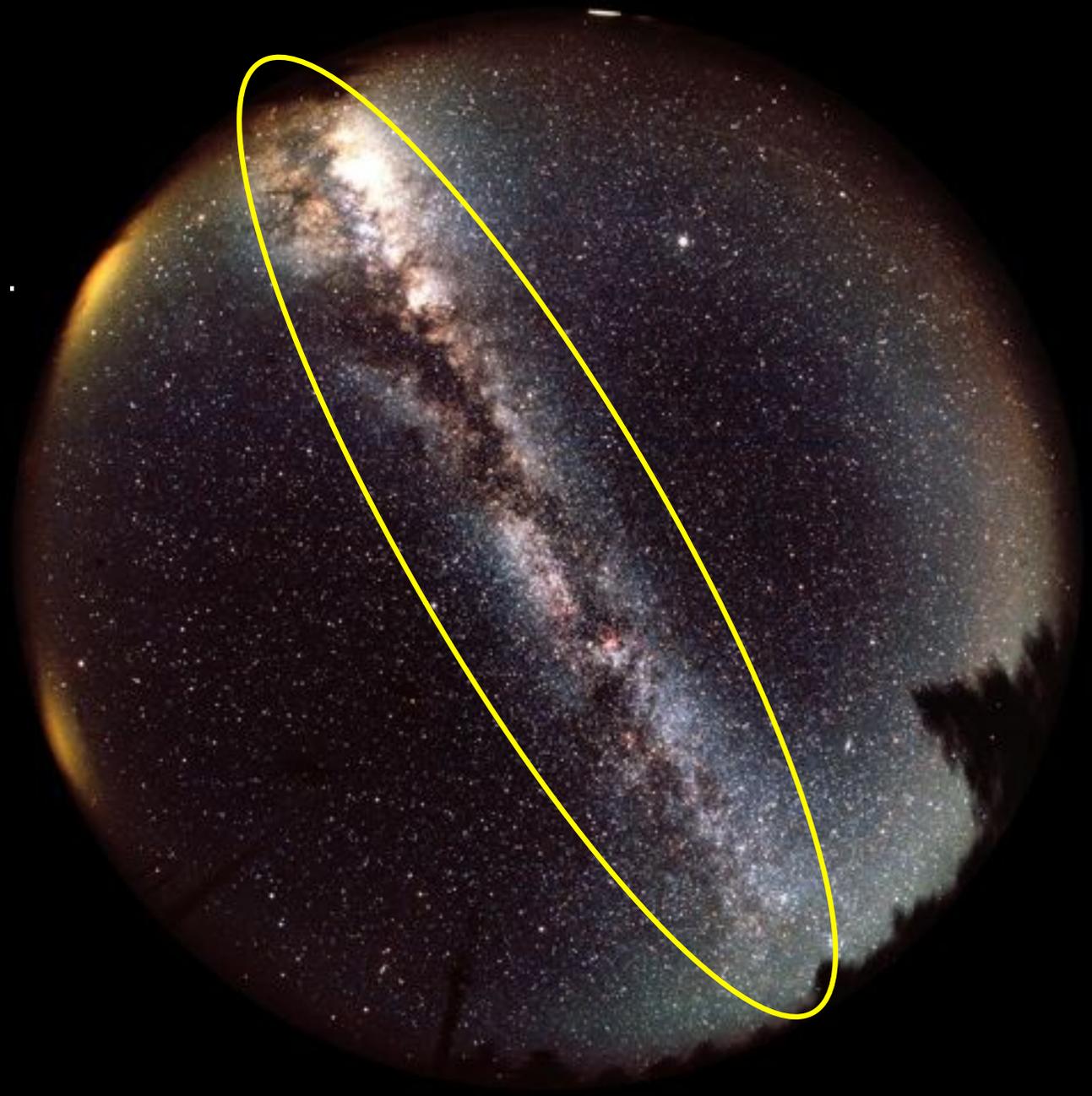
1. la nuit ...

□ pollution lumineuse...



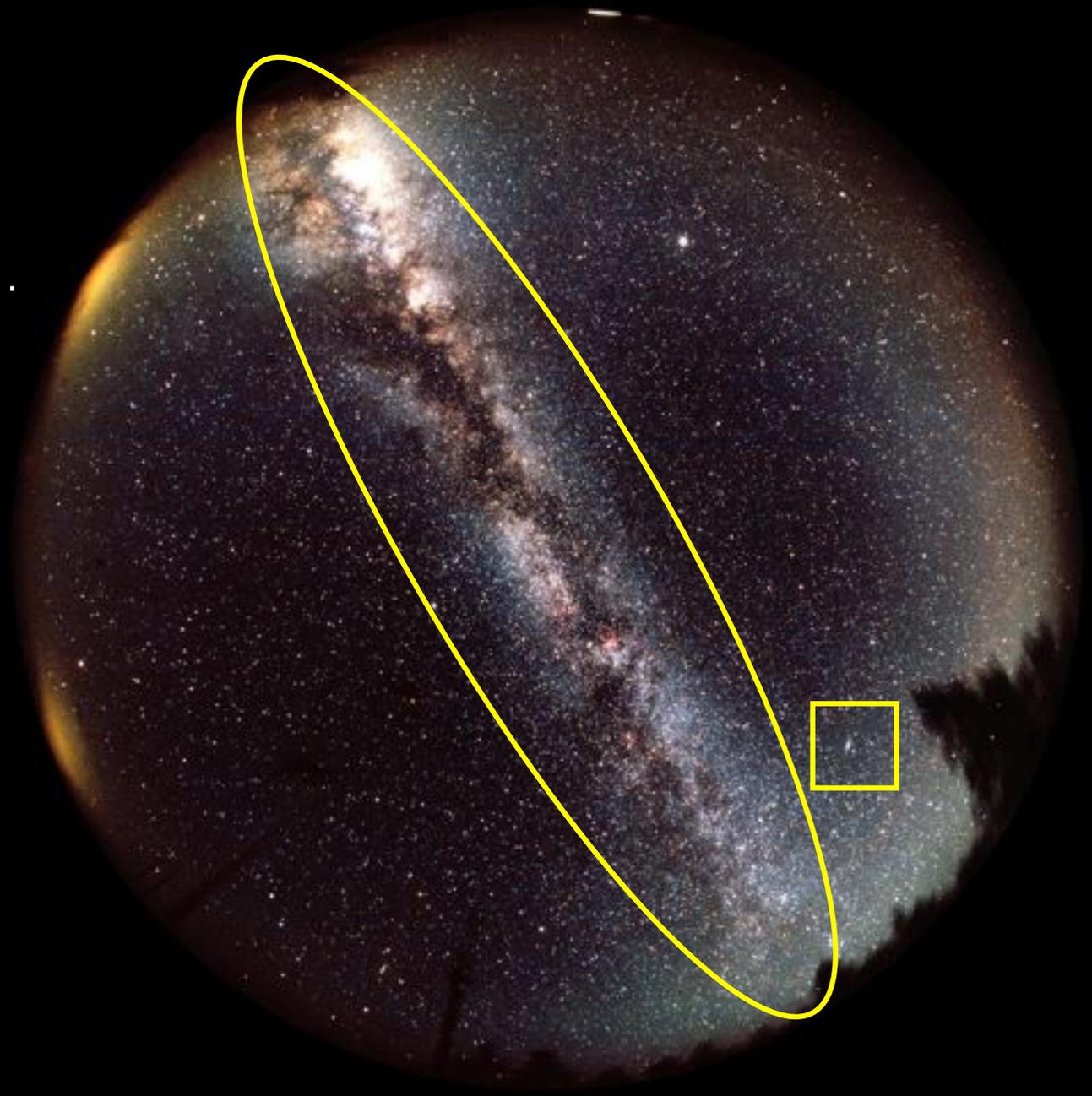
1. la nuit ...

- ❑ pollution lumineuse...
- ❑ notre Galaxie



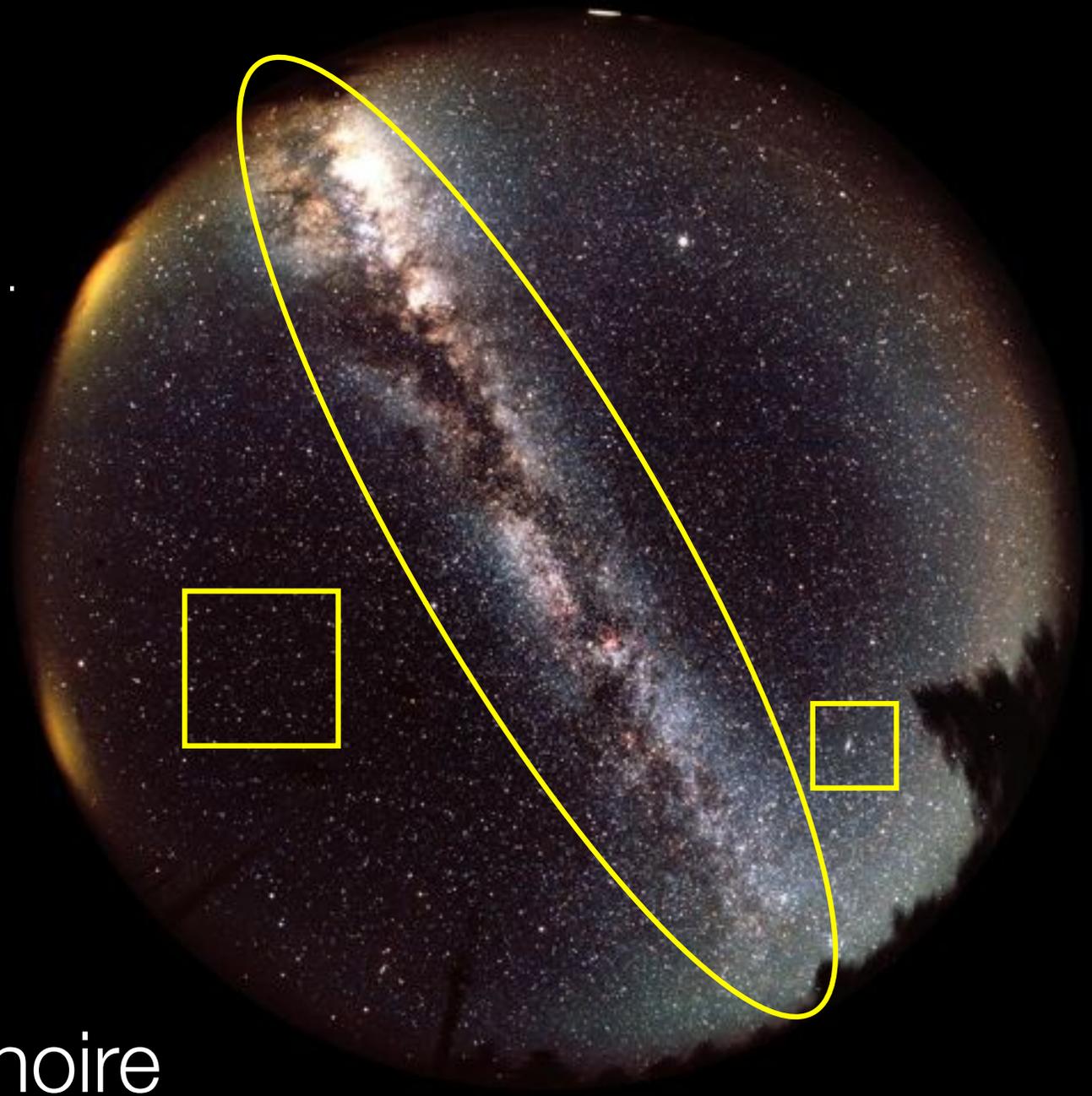
1. la nuit ...

- pollution lumineuse...
- notre Galaxie
- autres galaxies



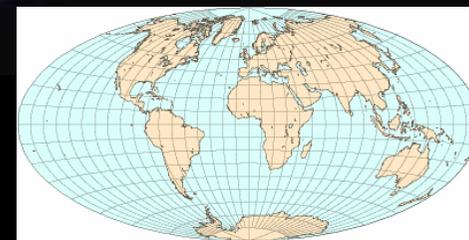
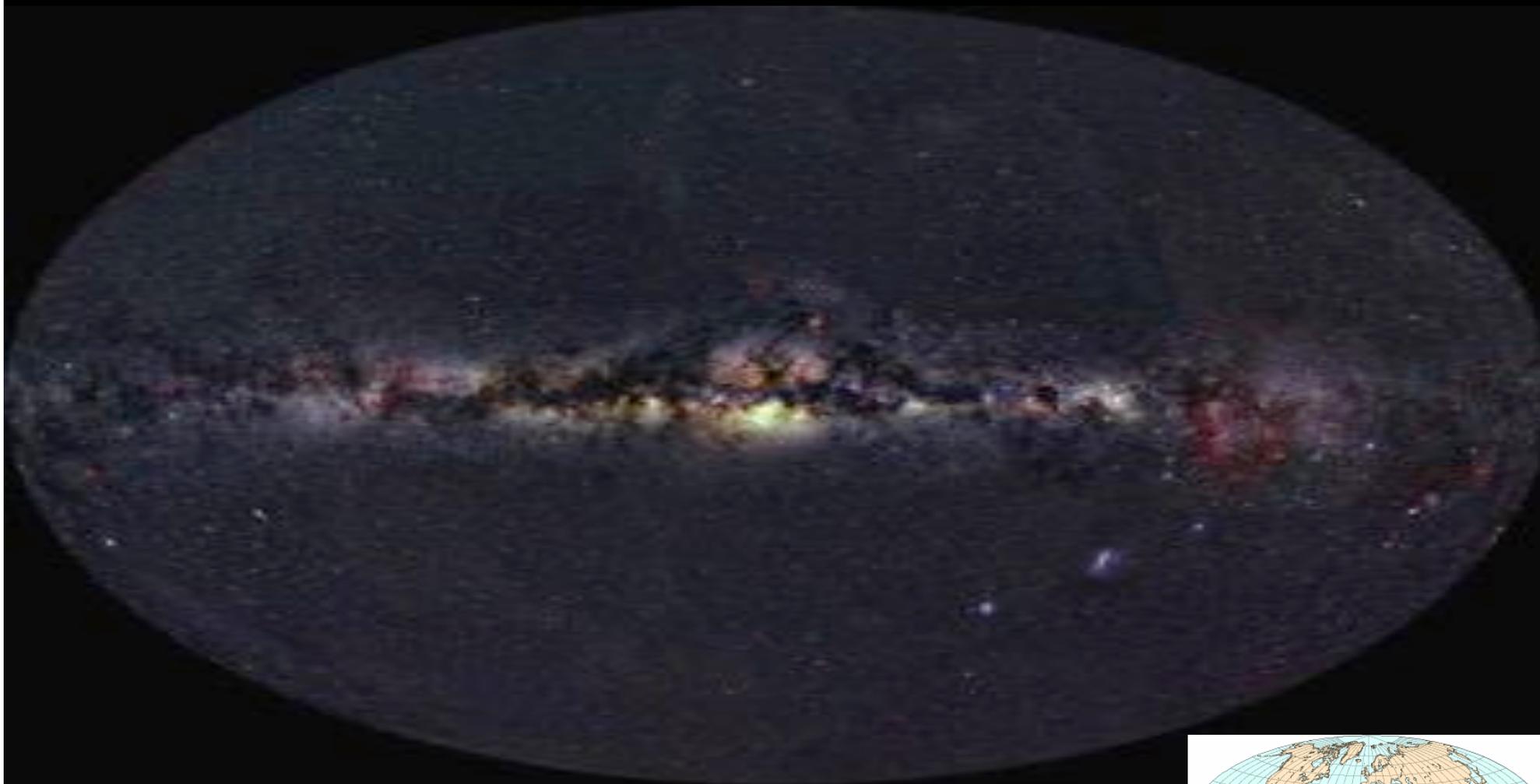
1. la nuit ...

- ❑ pollution lumineuse...
- ❑ notre Galaxie
- ❑ autres galaxies
- ❑ étoiles et ciel noir



... semble noire

nuit “noire”: le ciel dans le visible



projection de Mollweide
en coordonnées Galactiques

Axel Mellinger

http://canopus.physik.uni-potsdam.de/~axm/mwpan/mwpan_web.html

pourquoi la nuit est-elle noire ?

- paradoxe d'Olbers
 - le ciel devrait être très brillant compte-tenu du nombre incroyablement grand d'étoiles dans l'Univers
- faisons le calcul ensemble dans le cas le plus simple
 - un Univers homogène statique
 - rempli uniquement d'étoiles identiques de luminosité L_*

calcul simple du paradoxe d'Olbers

Exercice 3 Pourquoi la nuit est-elle noire ? Paradoxe d'Olbers simplifié.

Imaginons un espace euclidien rempli uniformément (et uniquement) d'étoiles, de densité n .

1- Expliquer pourquoi cette hypothèse n'est (vaguement) réaliste qu'à une certaine échelle spatiale. Laquelle approximativement ? Quelle est la dimension (et l'unité) de n ?

Supposons que chaque étoile est identique, de luminosité L_* , et qu'elle brille indéfiniment (ce qui est parfaitement irréaliste). La dimension de L_* est homogène à une puissance, et s'exprime par exemple en Watt.

2- Une étoile se situe à la distance r de l'observateur (situé sur Terre). Exprimer le flux F_* observé de l'étoile. Quelle est la dimension de F_* ?

3- Soit une coquille sphérique centrée sur l'observateur terrestre, de rayon r et d'épaisseur dr . Combien d'étoiles dN se trouvent dans cette coquille ? Vérifier la dimension de dN .

4- Calculer le flux dF_* reçu sur Terre par les étoiles de la coquille. Ce flux dépend-il de la distance de la coquille r ?

5- Calculer le flux F_* reçu sur Terre par l'ensemble des coquilles, en intégrant dF_* sur r entre $r = 0$ et $r = +\infty$. Cette intégrale converge-t-elle ? Qu'en déduisez-vous ?

Conclusion (dans ce cadre): flux reçu infini !

Si on avait utilisé une description un peu moins simpliste (mais néanmoins non physique cf diapo suivante), on aurait trouvé un flux égal au flux de l'étoile en chaque point du ciel...

calcul un peu plus raffiné

Exercice 4 *Paradoxe d'Oibers, version plus réaliste*

Dans l'exercice précédent, on a ignoré un effet important : les étoiles proches peuvent en réalité masquer les étoiles plus lointaines. Imaginons que les étoiles identiques sont des sphères de rayon R_* , et qu'elles se comportent comme des absorbeurs parfaits (i.e. elles absorbent parfaitement tout rayonnement incident sans changement de luminosité).

1- En vous basant sur les lois générales de la Physique, pensez-vous qu'un absorbeur parfait est un objet physique viable ?

On définit l'angle solide Ω d'une étoile située à une distance r par $\Omega = \pi \frac{R_*^2}{r^2}$.

NB : l'unité d'angle solide est le stéradian (sr), correspondant à des radians carrés. L'angle solide de la sphère vaut 4π . L'angle solide d'un cône d'ouverture α vaut $2\pi[1 - \cos(\alpha/2)]$.

2- Calculer l'angle solide $d\Omega$ occupé par les étoiles de la coquille de rayon r et d'épaisseur dr .

3- Calculer la probabilité élémentaire dP qu'une ligne de visée sur la sphère tombe sur l'angle solide $d\Omega$.

4- La probabilité P qu'une droite venant de l'observateur traverse N couches de rayon dr pour arriver à la distance $r = Ndr$ sans rencontrer d'étoile est : $P = e^{-n\pi R_*^2 r}$. On pose $\lambda = (n\pi R_*^2)^{-1}$. Interpréter physiquement λ , et indiquer qualitativement comment varie P en fonction de n , r et R_* .

5- Calculer le flux élémentaire dF reçu sur Terre, avec $dF = P dNF$.

6- Calculer le flux F reçu sur Terre, en intégrant dF de $r = 0$ à $r = +\infty$.

7- Avec ces hypothèses et le flux F trouvé, le ciel est-il noir ?

8- Quelles explications pouvez-vous avancer pour expliquer le désaccord entre l'observation (le ciel est bien noir !) et les résultats trouvés ?

pourquoi la nuit est-elle noire ?

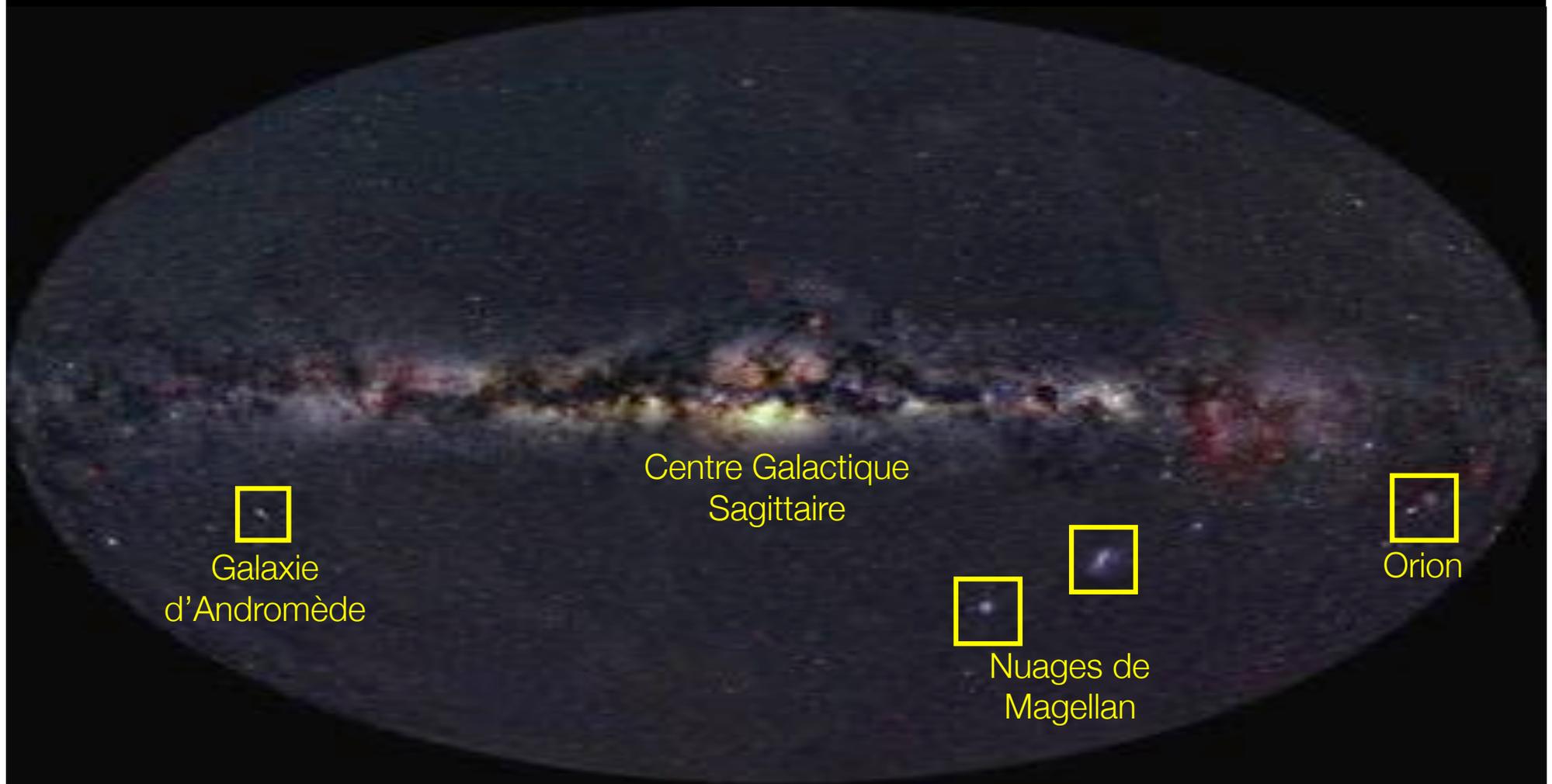
- Digges (16^è), **Chéseaux** (17^è), Halley (18^è), **Olbers** (19^è)
- Herschel, Kant, Proctor, Fournier d'Albe, Charlier
- **Poe** (19^è), **Kelvin** (19^è)
- Wesson (1987, 1991)

- finitude vitesse lumière c
 - âge fini des objets
 - expansion Univers
- **horizon cosmologique** → oui

- existence d'**émissions reliques**
 - recombinaison: **fond cosmologique**
 - formation et évolution des galaxies: **fond extragalactique**
 - expansion, et prise en compte de tout le **spectre e. m.**
- non

2. à quoi ressemble la nuit ?

le ciel dans le visible



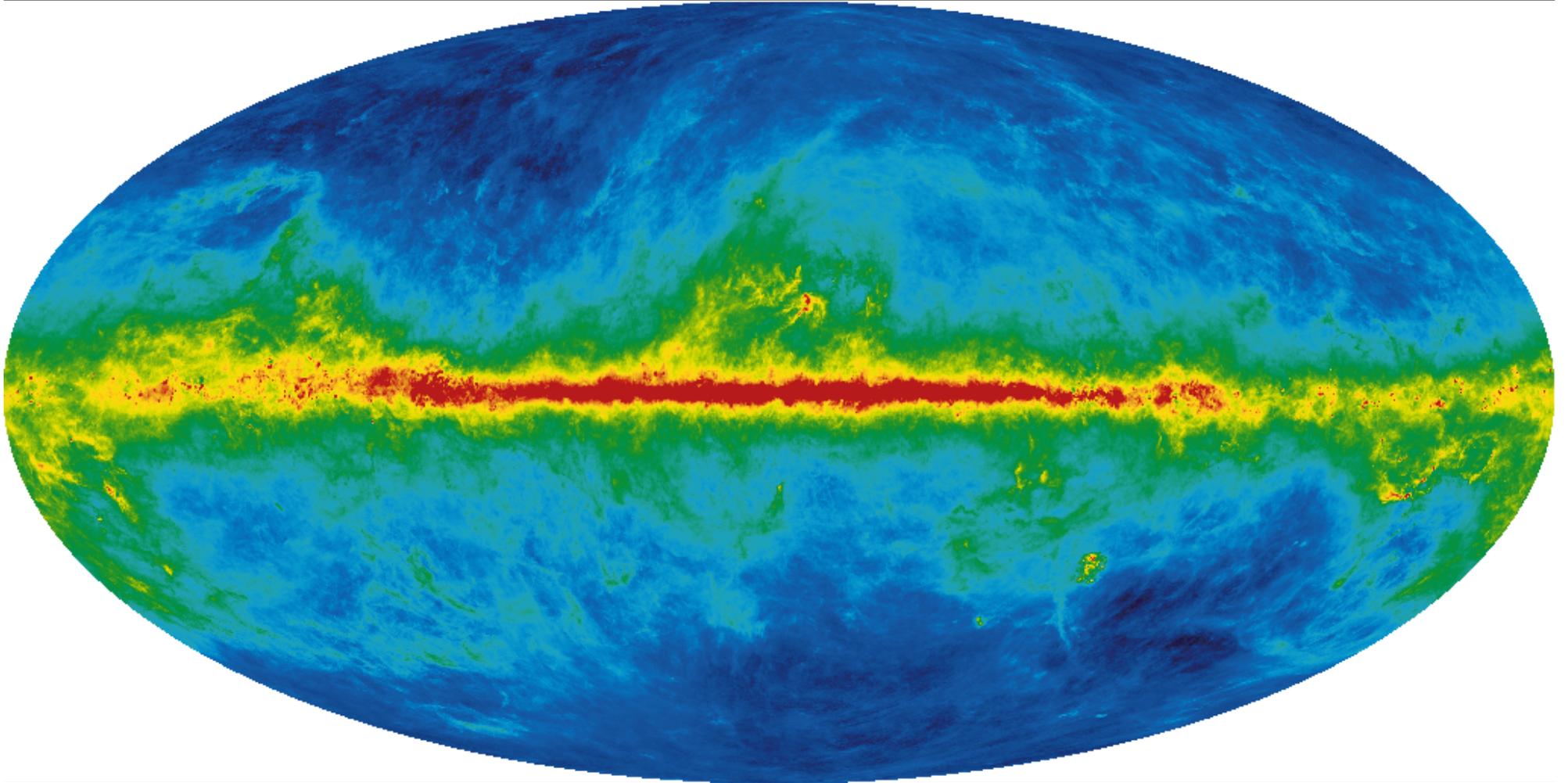
Galaxie
d'Andromède

Centre Galactique
Sagittaire

Nuages de
Magellan

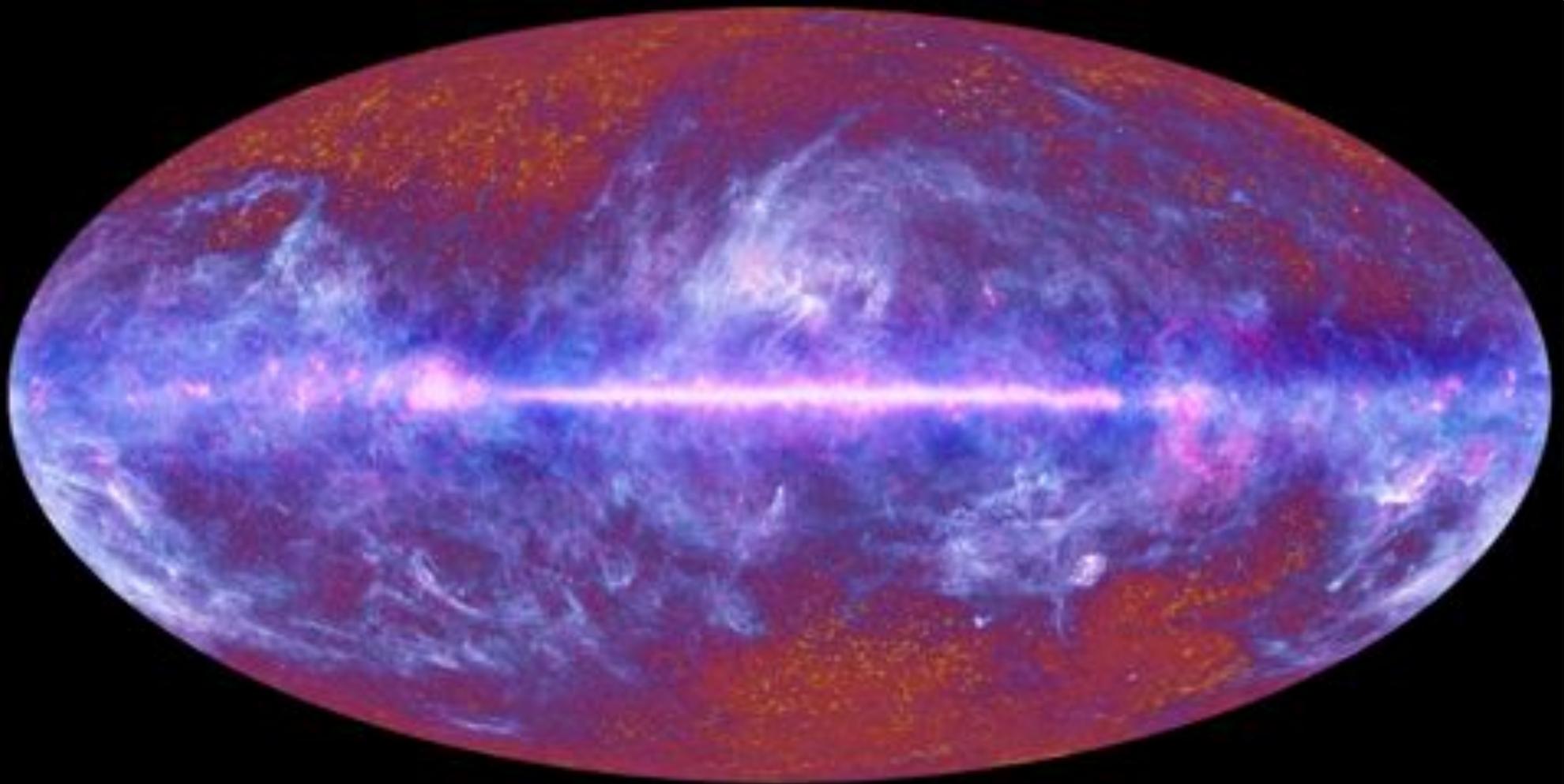
Orion

le ciel en infrarouge



IRAS 100um IRIS

le ciel en micro-ondes [mm]

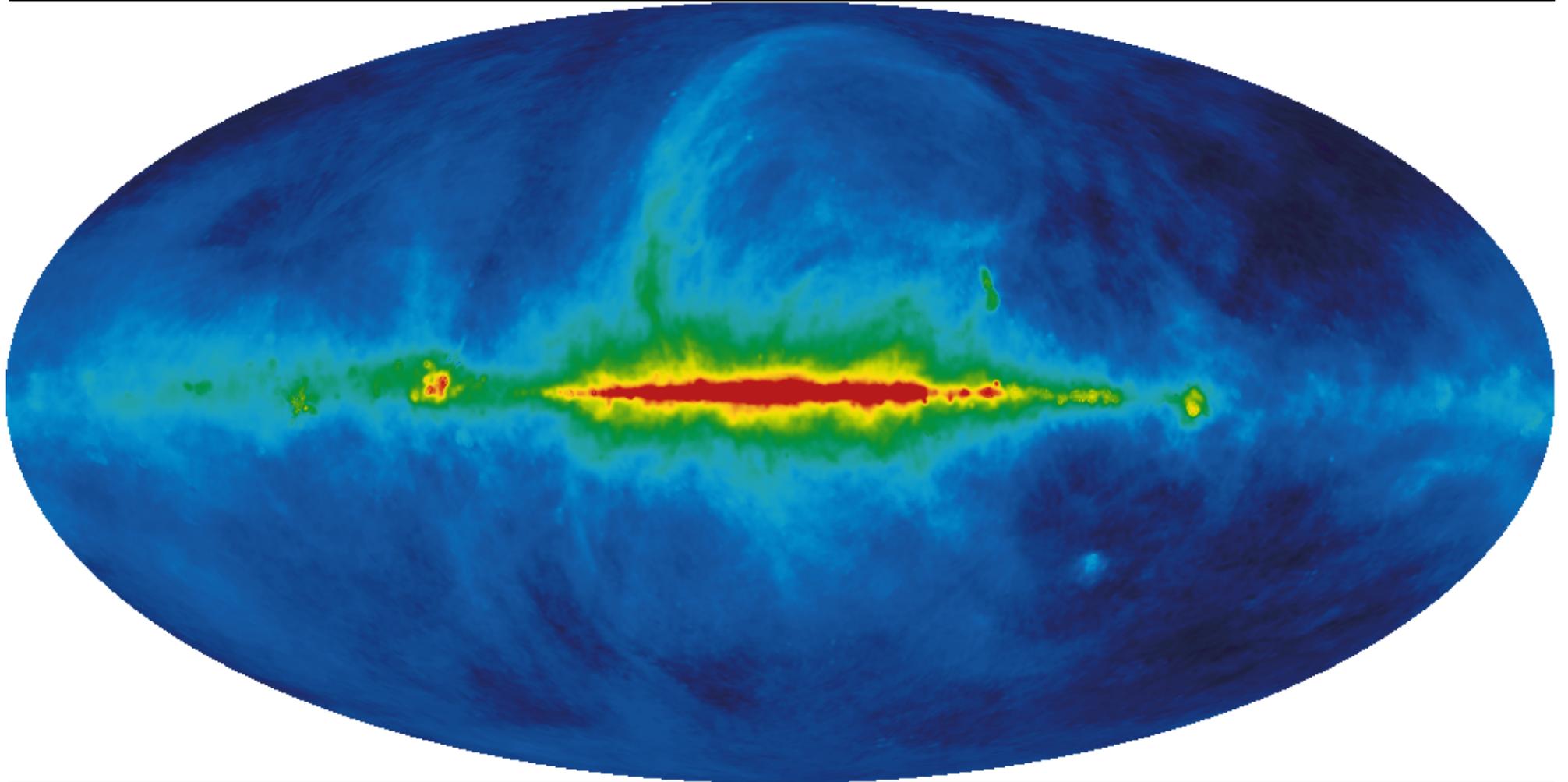


The PLANCK one-year all-sky survey



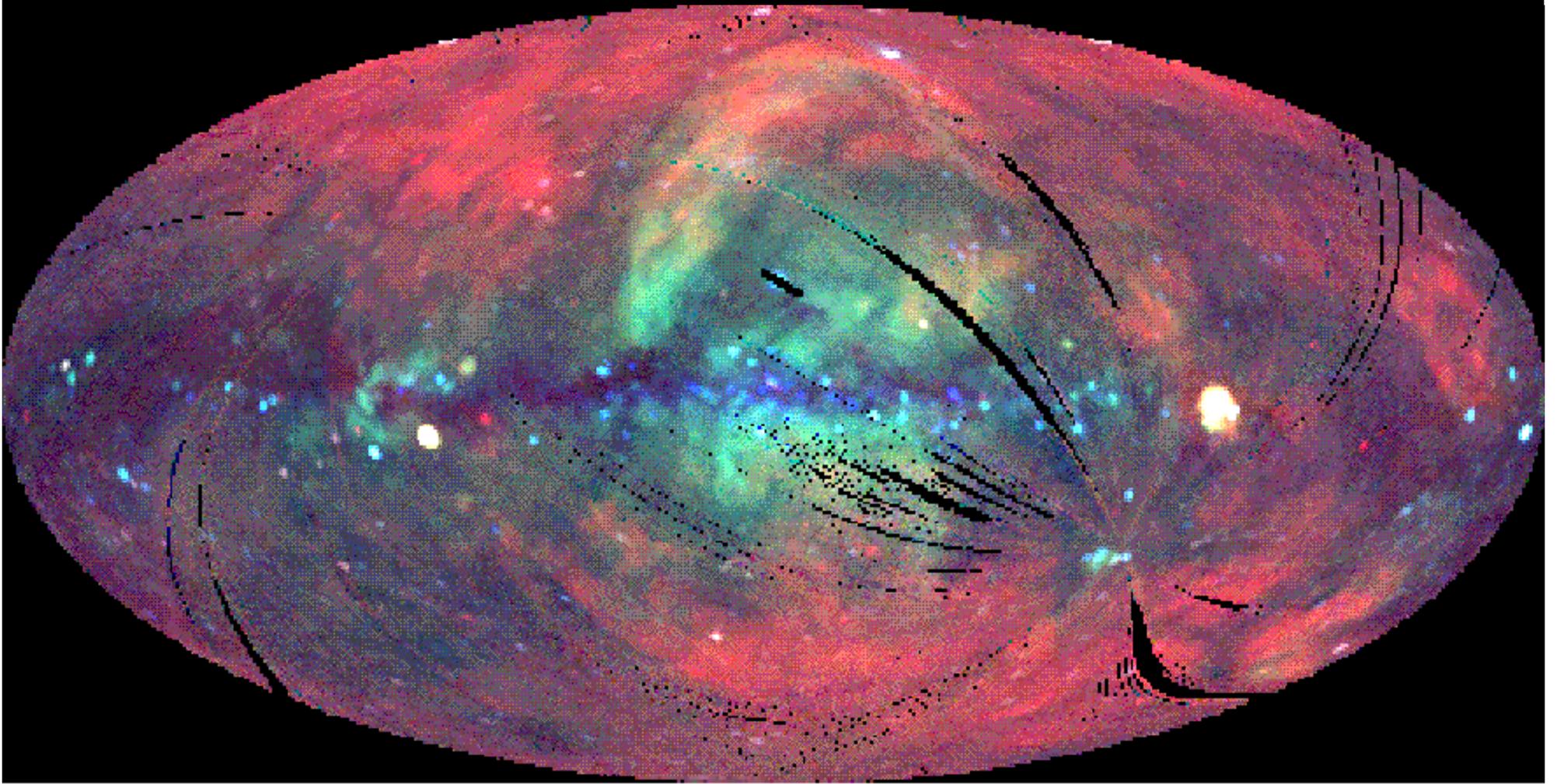
[c] ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

le ciel en ondes radio



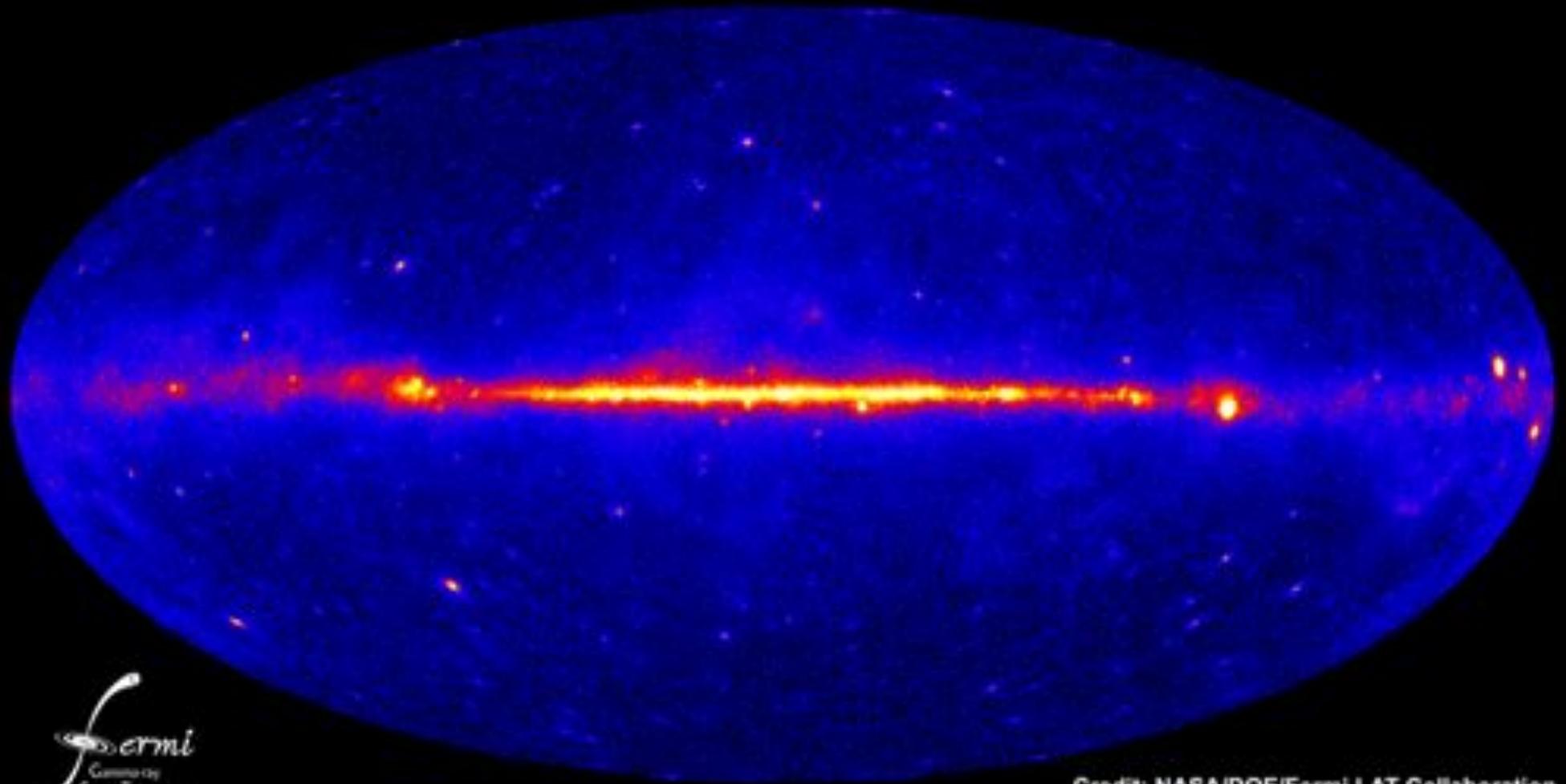
21 cm Leiden/Parkes

le ciel en rayons X



ROSAT

le ciel en rayons gamma



fermi
Gamma-ray
Space Telescope

Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

FERMI LAT

la nuit ...



- est **noire** dans le domaine visible
- apparaît brillante
 - En infrarouge
 - Dans le domaine submillimétrique
 - En radio
 - Dans les rayons X et gamma

- Pourquoi existe t-il de telles différences ?
- Quelles sont les **origines** de ces rayonnements ?

- Ces rayonnements nous renseignent-ils sur **la formation et l'évolution de l'Univers et de ses constituants** ?

« voir » le CMB en plein jour à Paris



observations du **CMB (fond cosmologique)** à la Penzias & Wilson au laboratoire APC (Paris) avec Michel Piat, à 10 GHz (~3cm) avec les étudiants du Master 2 Pro OSAE (collaboration avec IAS Orsay et université Paris Sud 11)

les émission reliques (le CMB en tout cas) peuvent être intenses !

photos: H. Dole

3. rayonnement cosmologique

Rayonnement radio en 1964



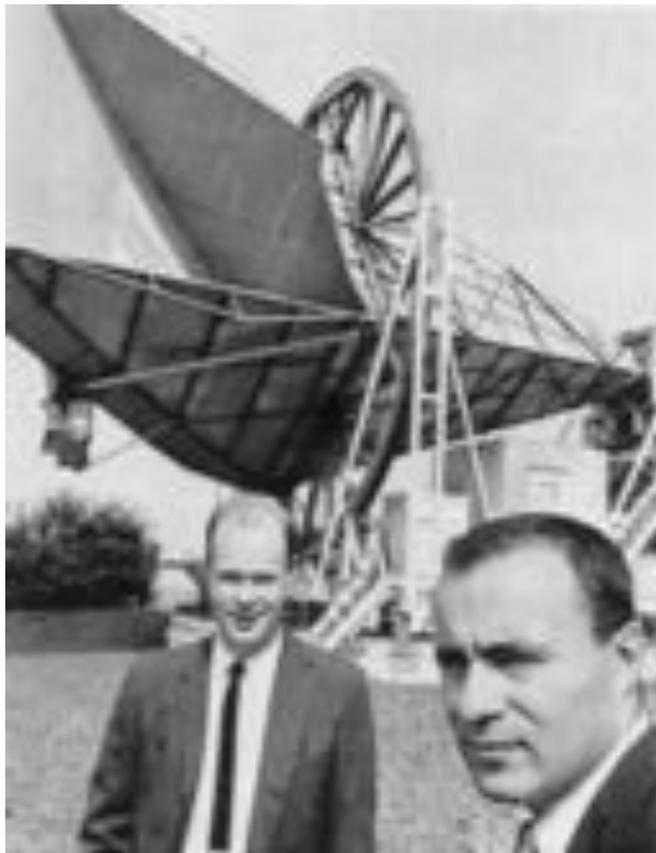
Bell Labs, New Jersey, 1964



Le fond diffus cosmologique

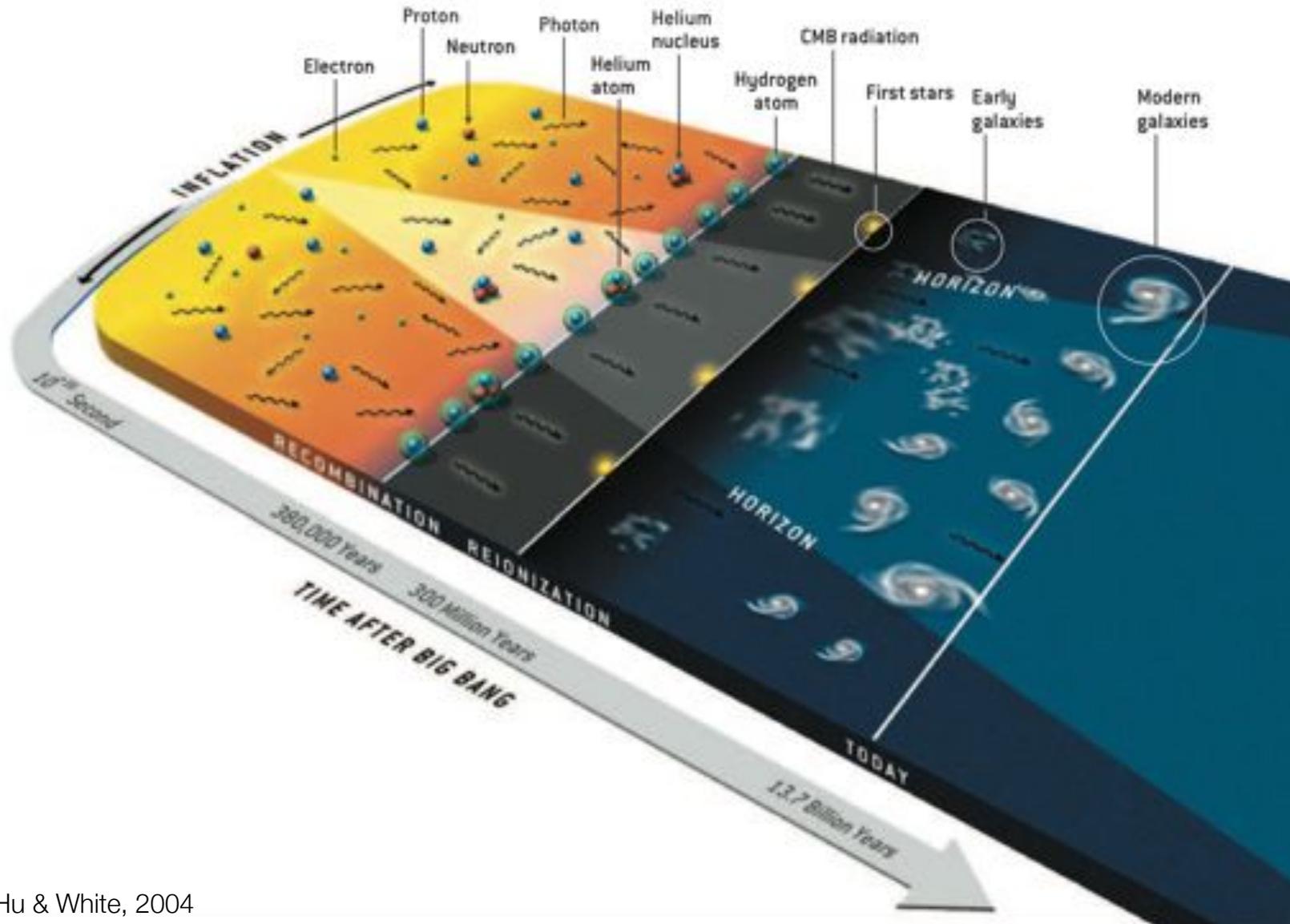
Découvert en 1965 par
Arno Penzias & Robert Wilson.

Prix Nobel 1978 "for their discovery of the
cosmic microwave background radiation"



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

petite histoire de l'Univers

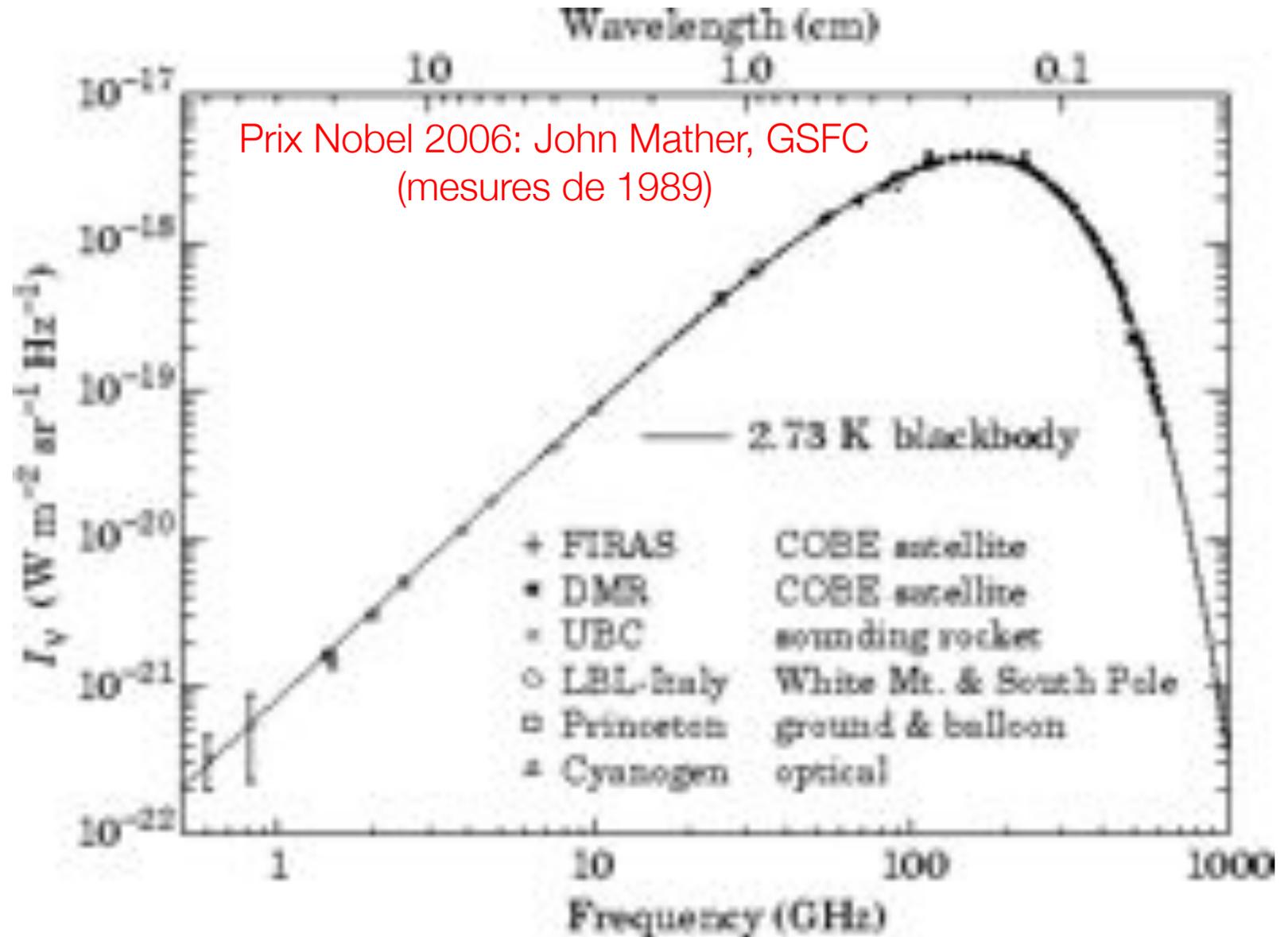


Hu & White, 2004

propriétés du fond diffus cosmologique

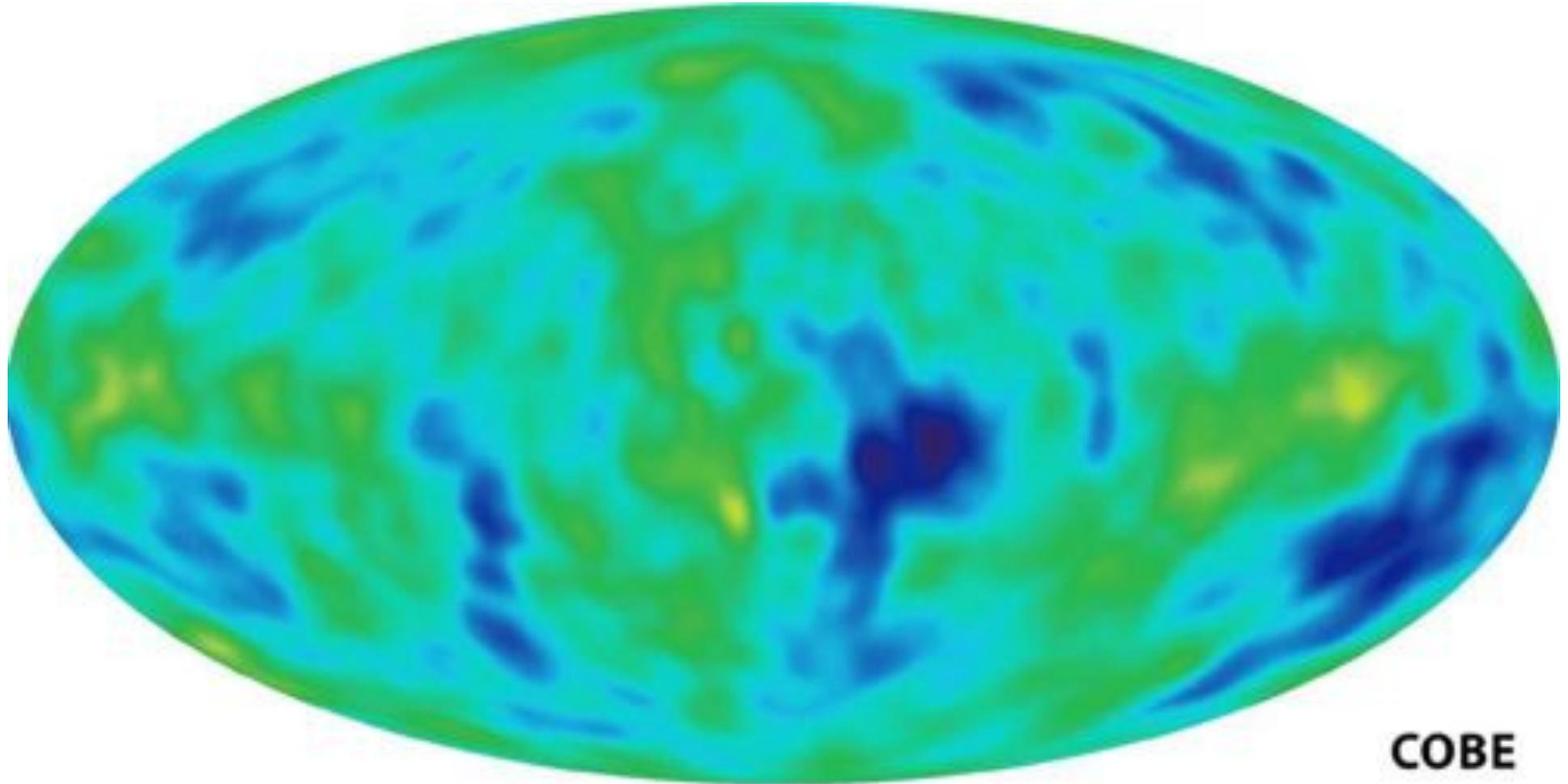
rayonnement
de corps noir
 $T=2.725\text{ K}$

L'Univers est
rempli de
rayonnement:
**la nuit n'est
pas noire,**
mais brillante
en radio.



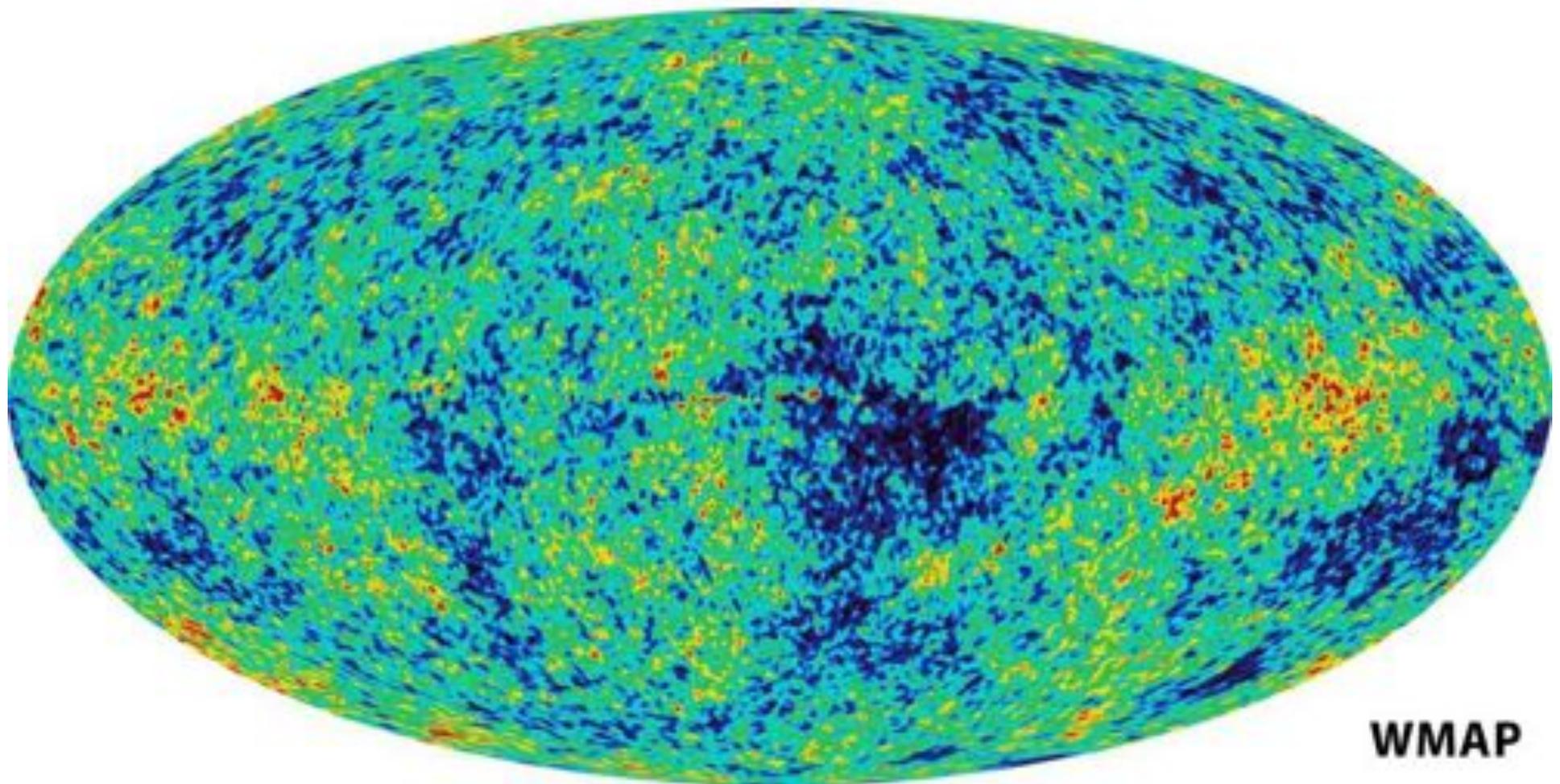
fluctuations de température

l'amplitude des fluctuations est de l'ordre de la dizaine de microKelvin !

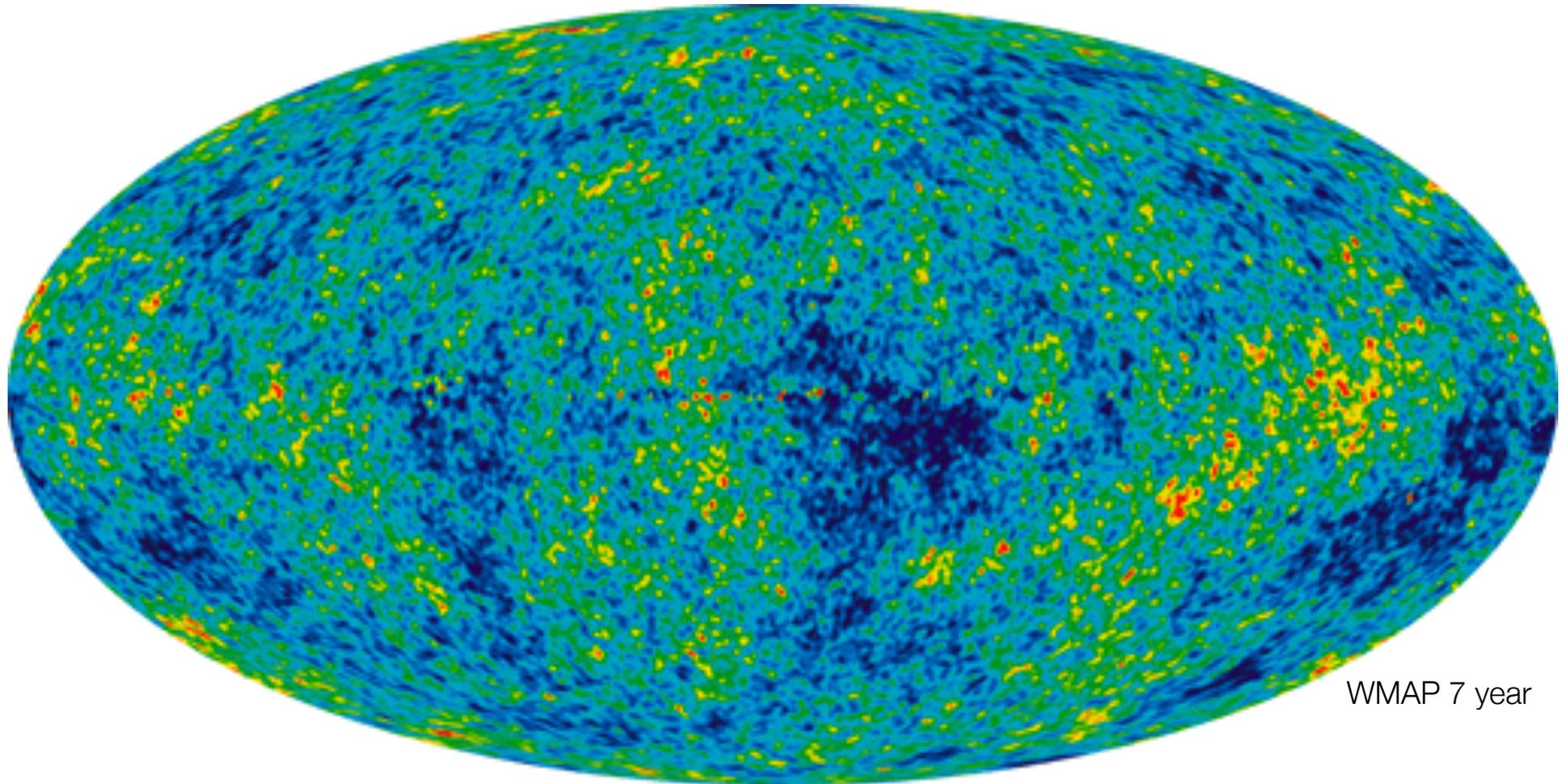


Prix Nobel 2006: George Smoot, Berkeley
(mesures de 1992)

fluctuations de température

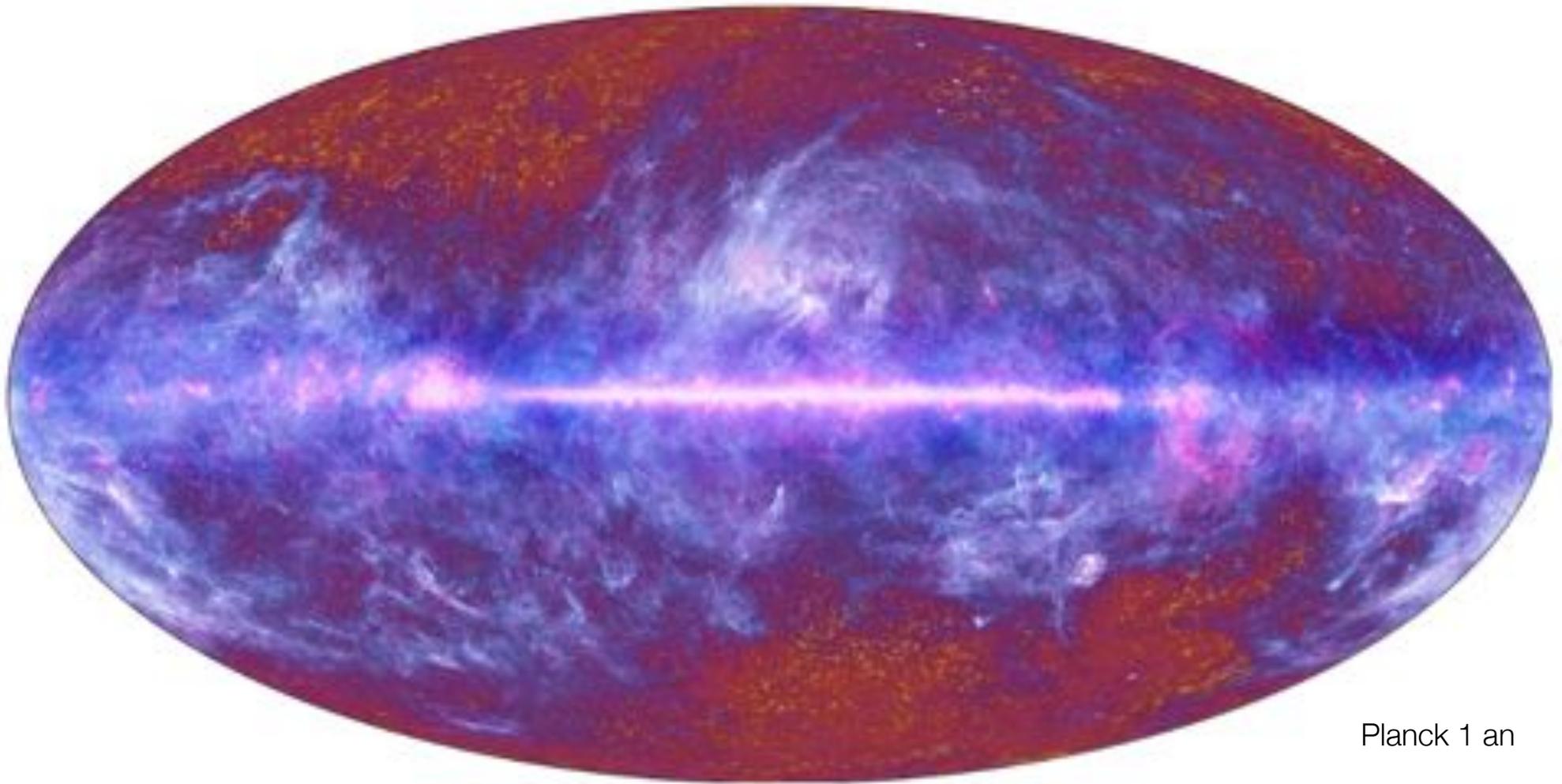


fluctuations de température



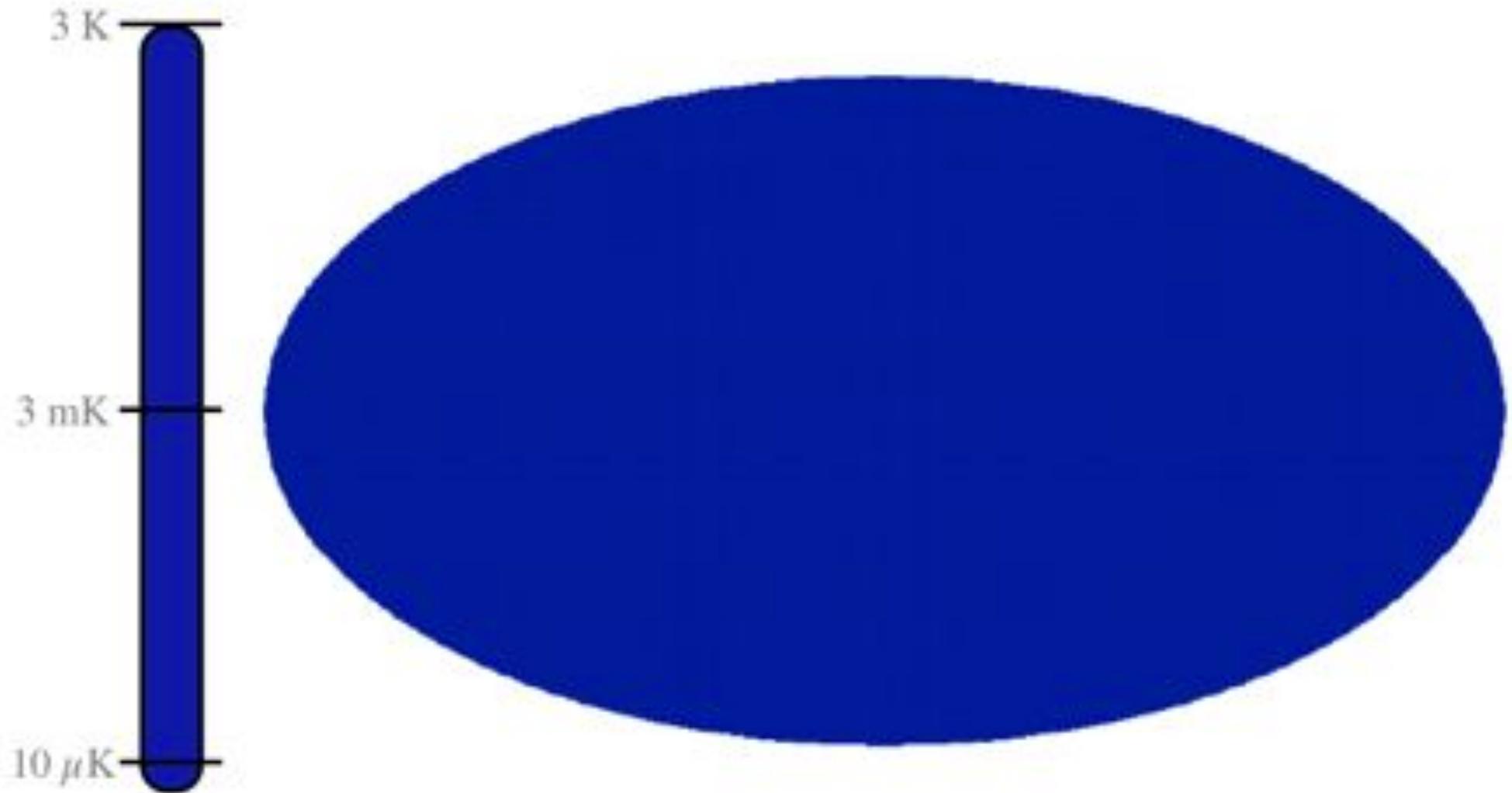
fluctuations de température

+ Galaxie et galaxies, amas etc.

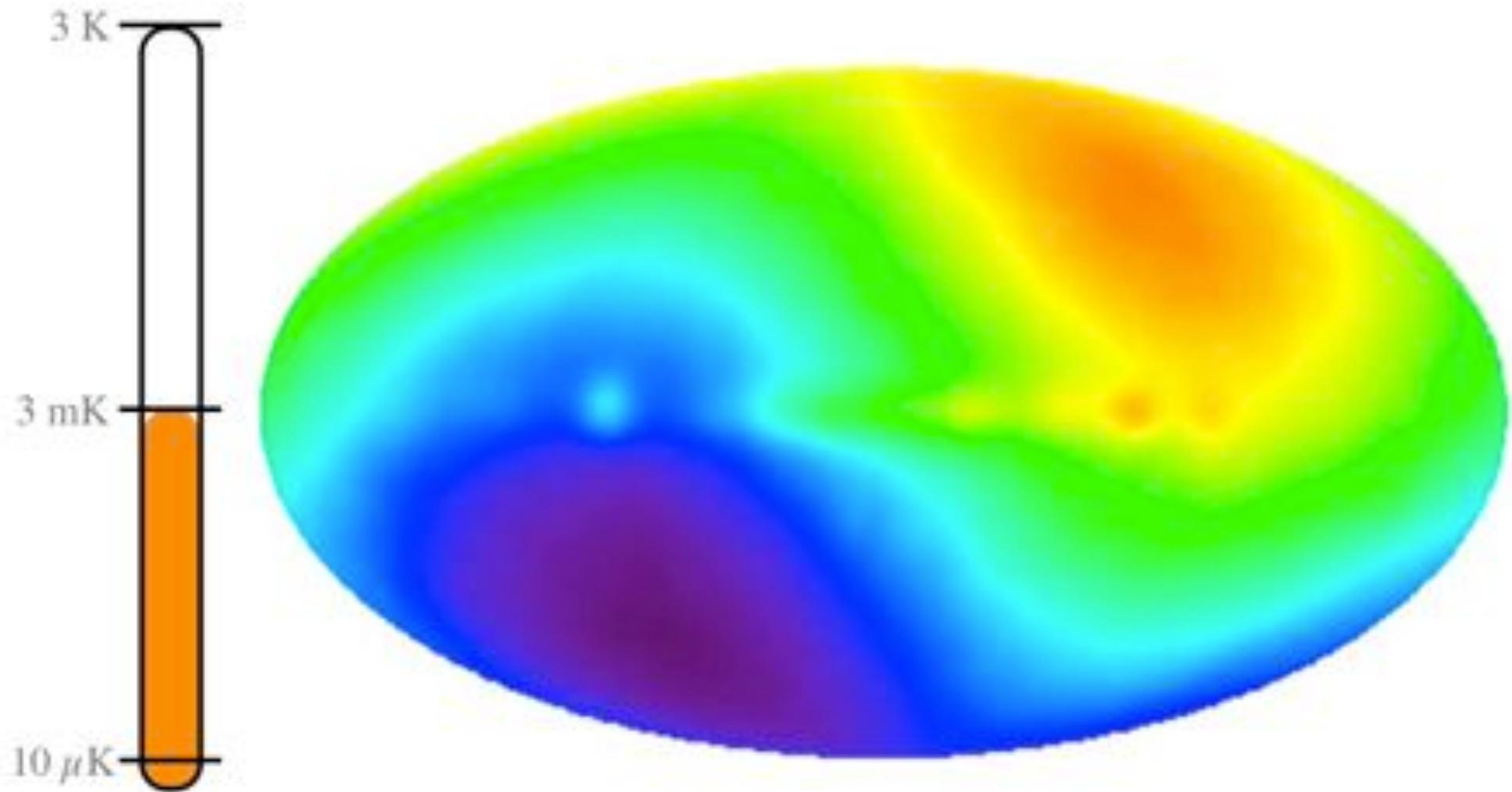


Planck 1 an

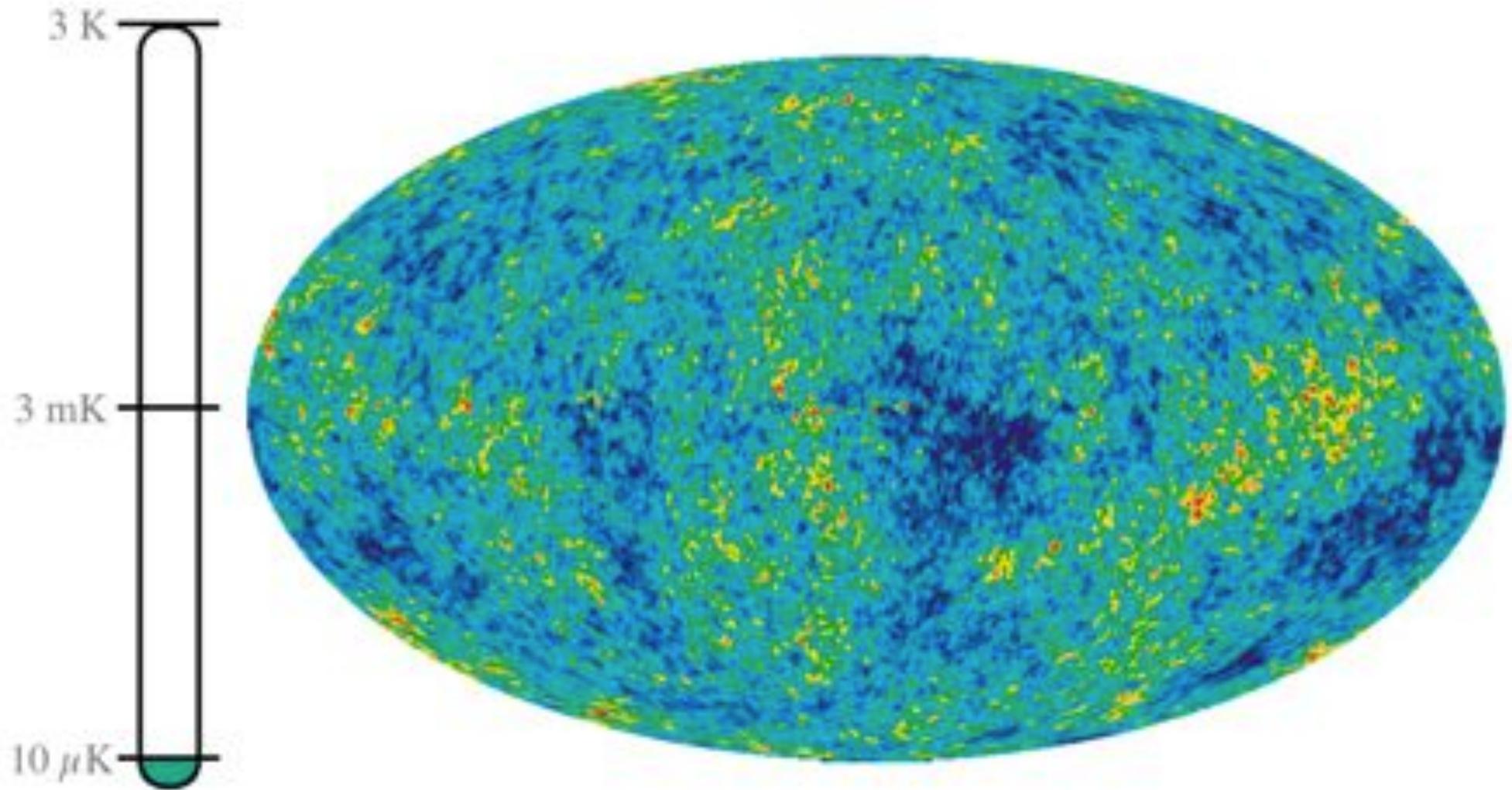
fond cosmologique CMB



fond cosmologique CMB



fond cosmologique CMB

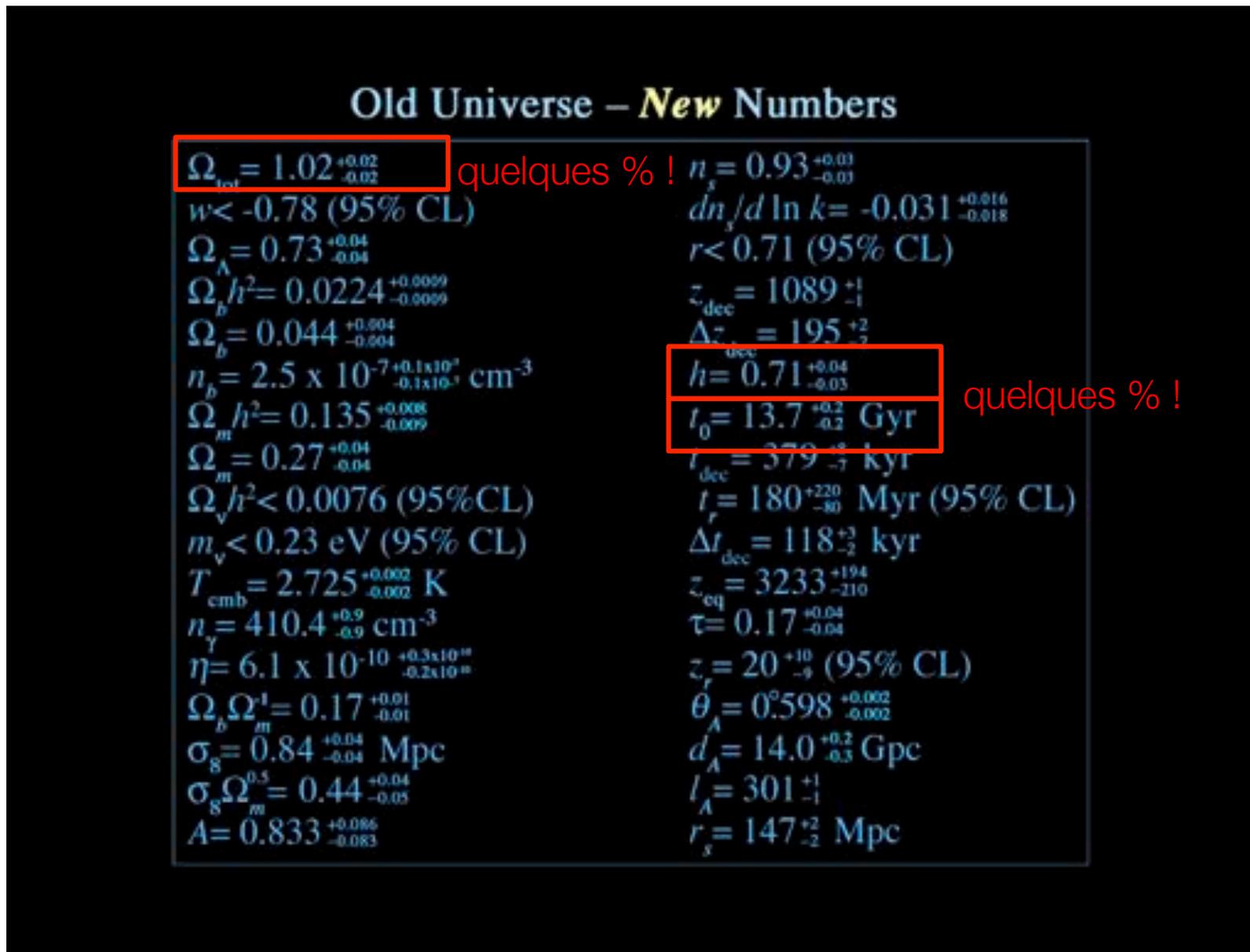


l'Univers en chiffres – précis !

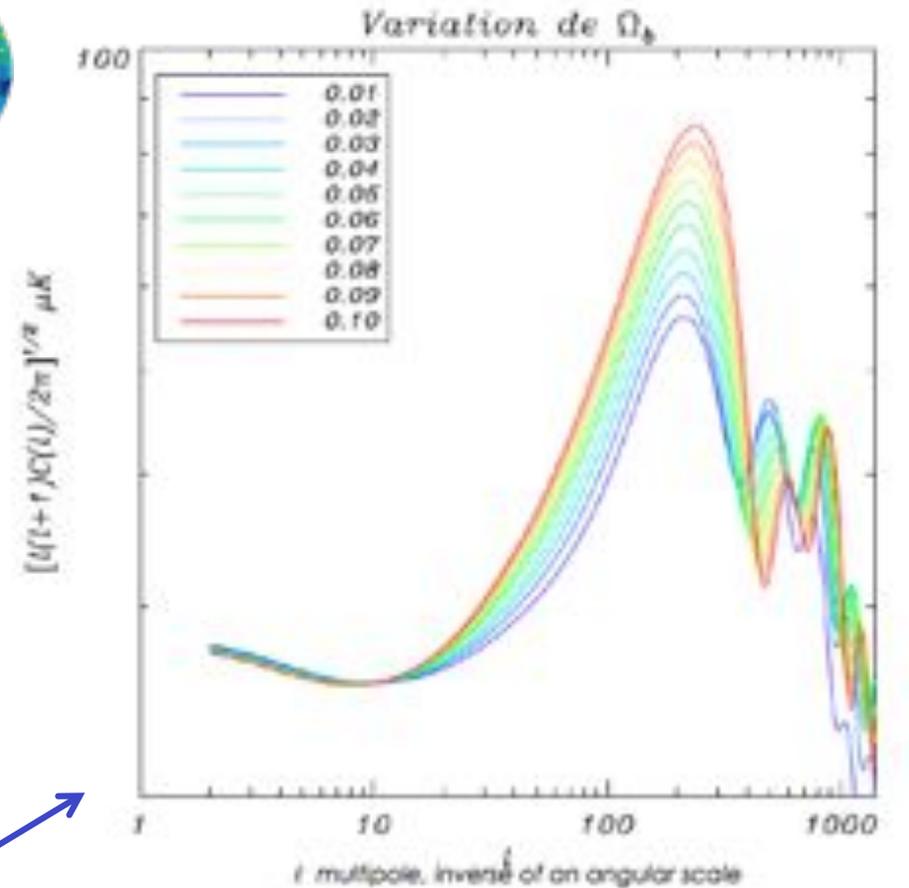
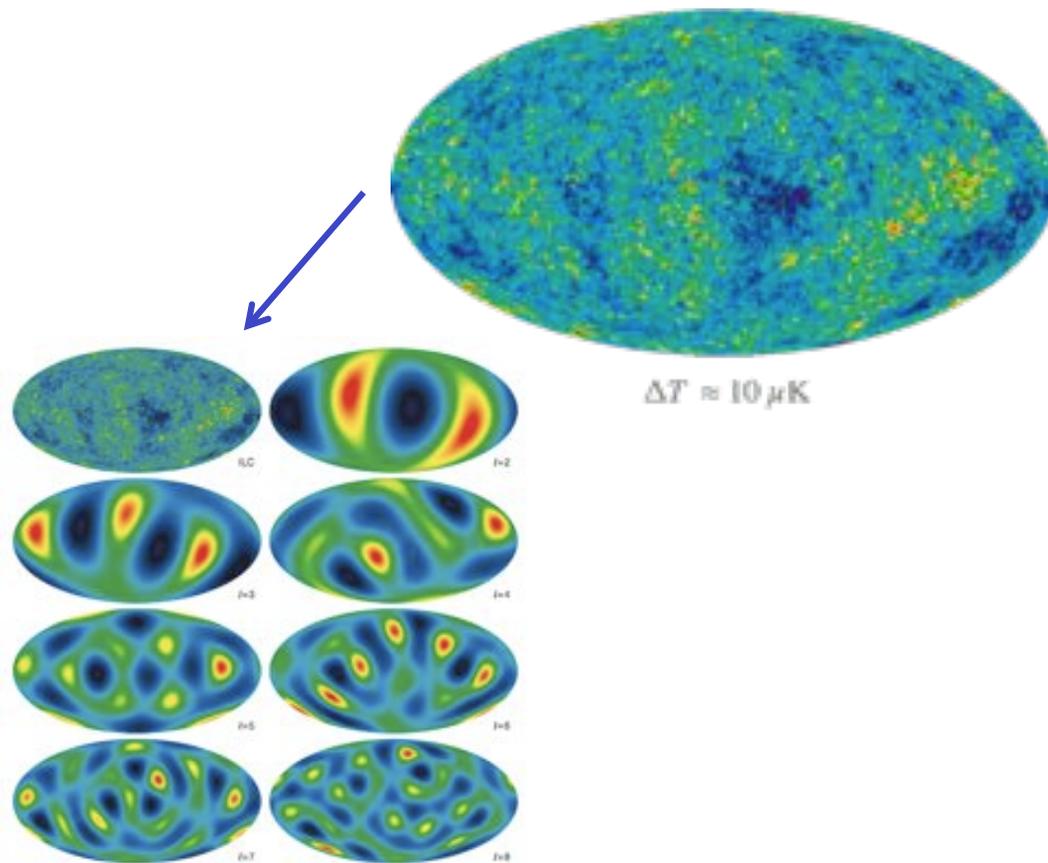
Old Universe – *New* Numbers

$\Omega_{\text{tot}} = 1.02^{+0.02}_{-0.02}$	$n_s = 0.93^{+0.03}_{-0.03}$
$w < -0.78$ (95% CL)	$dn_s/d \ln k = -0.031^{+0.016}_{-0.018}$
$\Omega_{\Lambda} = 0.73^{+0.04}_{-0.04}$	$r < 0.71$ (95% CL)
$\Omega_b h^2 = 0.0224^{+0.0009}_{-0.0009}$	$z_{\text{dec}} = 1089^{+1}_{-1}$
$\Omega_b = 0.044^{+0.004}_{-0.004}$	$\Delta z_{\text{dec}} = 195^{+2}_{-2}$
$n_b = 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$ <small>$^{+0.1 \times 10^{-7}}_{-0.1 \times 10^{-7}}$</small>	$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$
$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$	$t_0 = 13.7^{+0.2}_{-0.2}$ Gyr
$\Omega_m = 0.27^{+0.04}_{-0.04}$	$t_{\text{dec}} = 379^{+8}_{-7}$ kyr
$\Omega_v h^2 < 0.0076$ (95% CL)	$t_r = 180^{+220}_{-80}$ Myr (95% CL)
$m_\nu < 0.23$ eV (95% CL)	$\Delta t_{\text{dec}} = 118^{+3}_{-2}$ kyr
$T_{\text{cmb}} = 2.725^{+0.002}_{-0.002}$ K	$z_{\text{eq}} = 3233^{+194}_{-210}$
$n_\gamma = 410.4^{+0.9}_{-0.9}$ cm ⁻³	$\tau = 0.17^{+0.04}_{-0.04}$
$\eta = 6.1 \times 10^{-10}$ <small>$^{+0.3 \times 10^{-10}}_{-0.2 \times 10^{-10}}$</small>	$z_r = 20^{+10}_{-9}$ (95% CL)
$\Omega_b \Omega_m^{-1} = 0.17^{+0.01}_{-0.01}$	$\theta = 0.598^{+0.002}_{-0.002}$
$\sigma_8 = 0.84^{+0.04}_{-0.04}$ Mpc	$d_A = 14.0^{+0.2}_{-0.3}$ Gpc
$\sigma_8 \Omega_m^{0.5} = 0.44^{+0.04}_{-0.05}$	$l_A = 301^{+1}_{-1}$
$A = 0.833^{+0.086}_{-0.083}$	$r_s = 147^{+2}_{-2}$ Mpc

l'Univers en chiffres – précis !



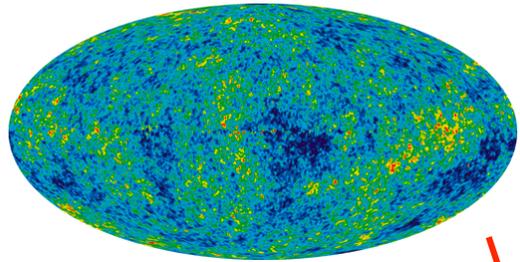
statistique des anisotropies



$$\frac{\Delta T(\mathbf{n})}{T_0} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^T Y_{\ell m}(\mathbf{n})$$

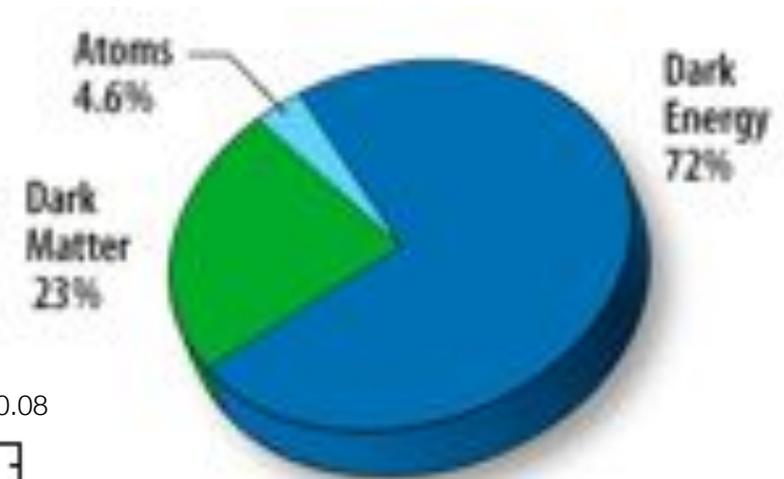
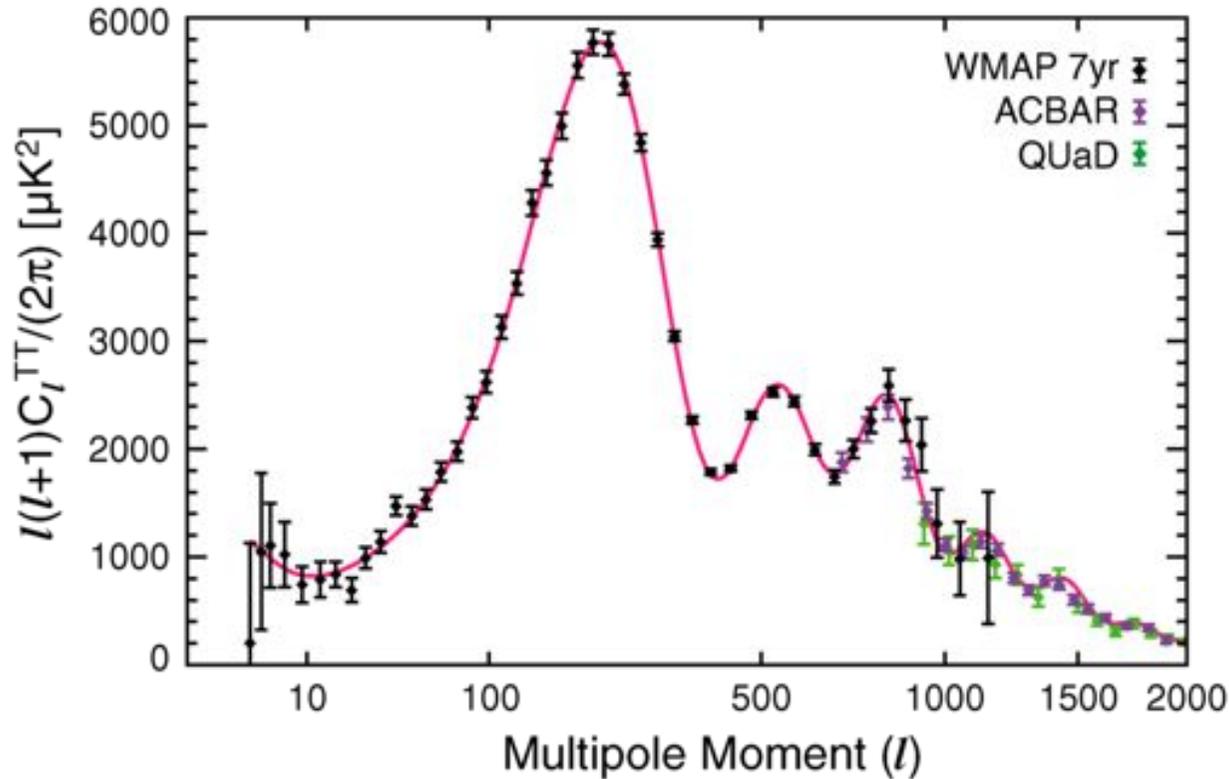
$$C_{\ell}^{TT} = \langle a_{\ell m}^T \cdot a_{\ell m}^{T*} \rangle$$

contenu de l'Univers



Echelle angulaire en degrés

20 2 0.4 0.2 0.12 0.08



petite histoire de l'Univers



surface de dernière diffusion

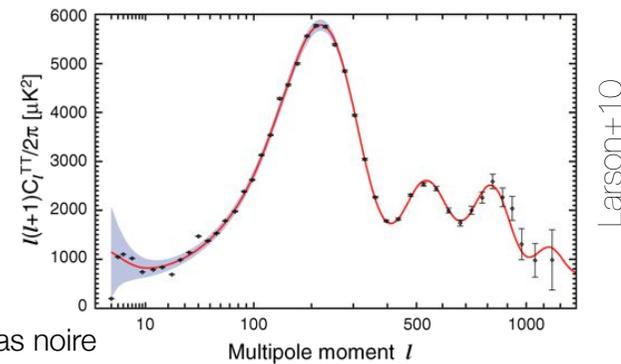
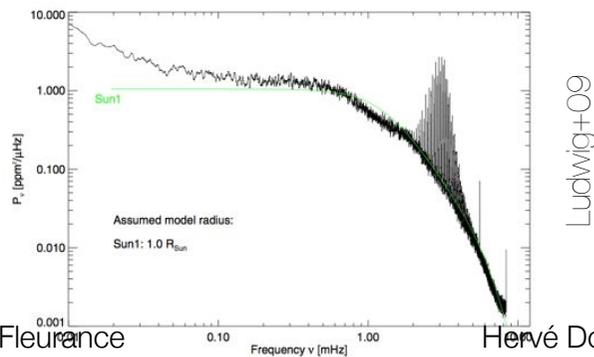
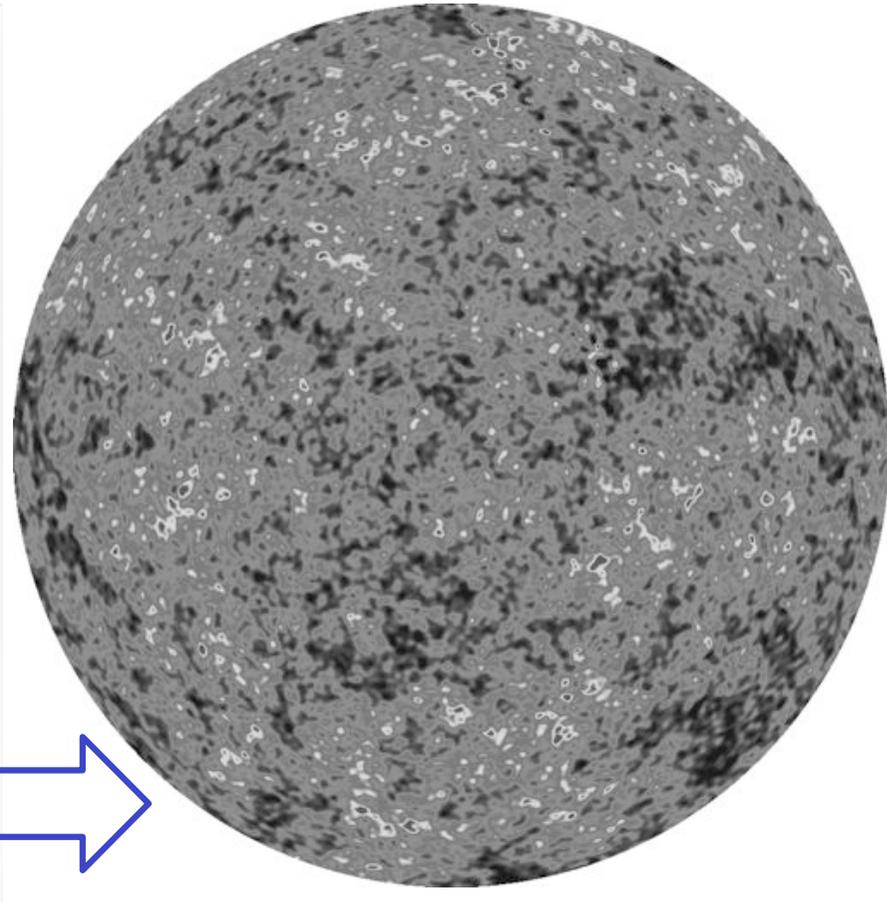
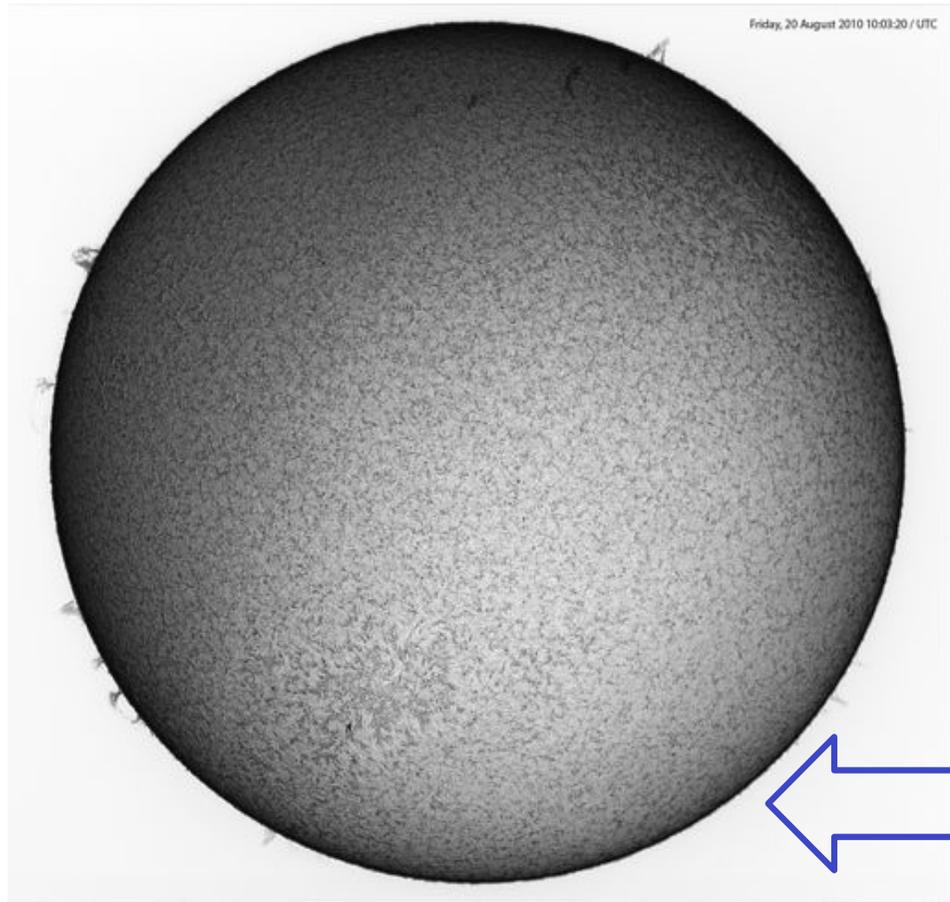
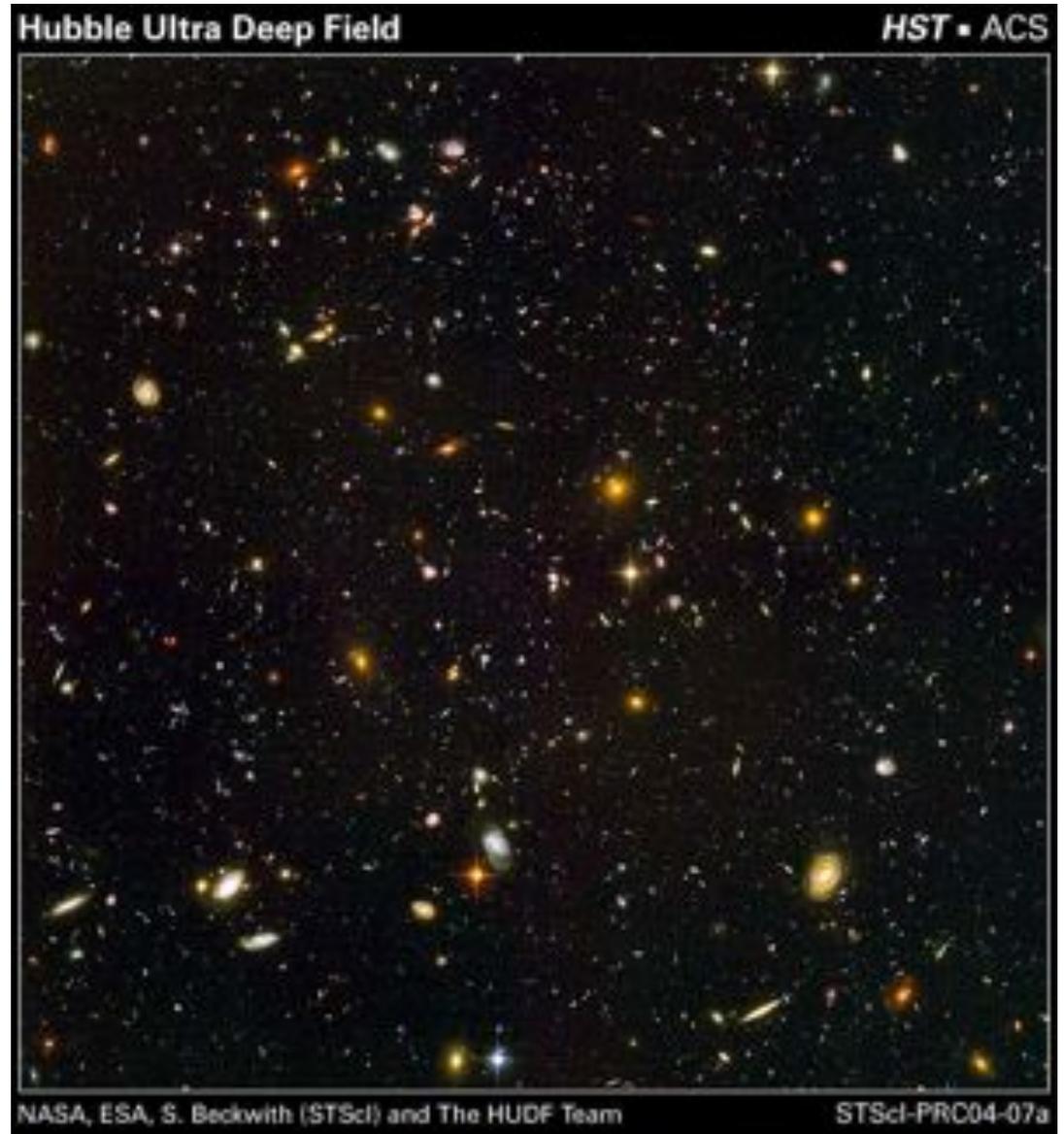


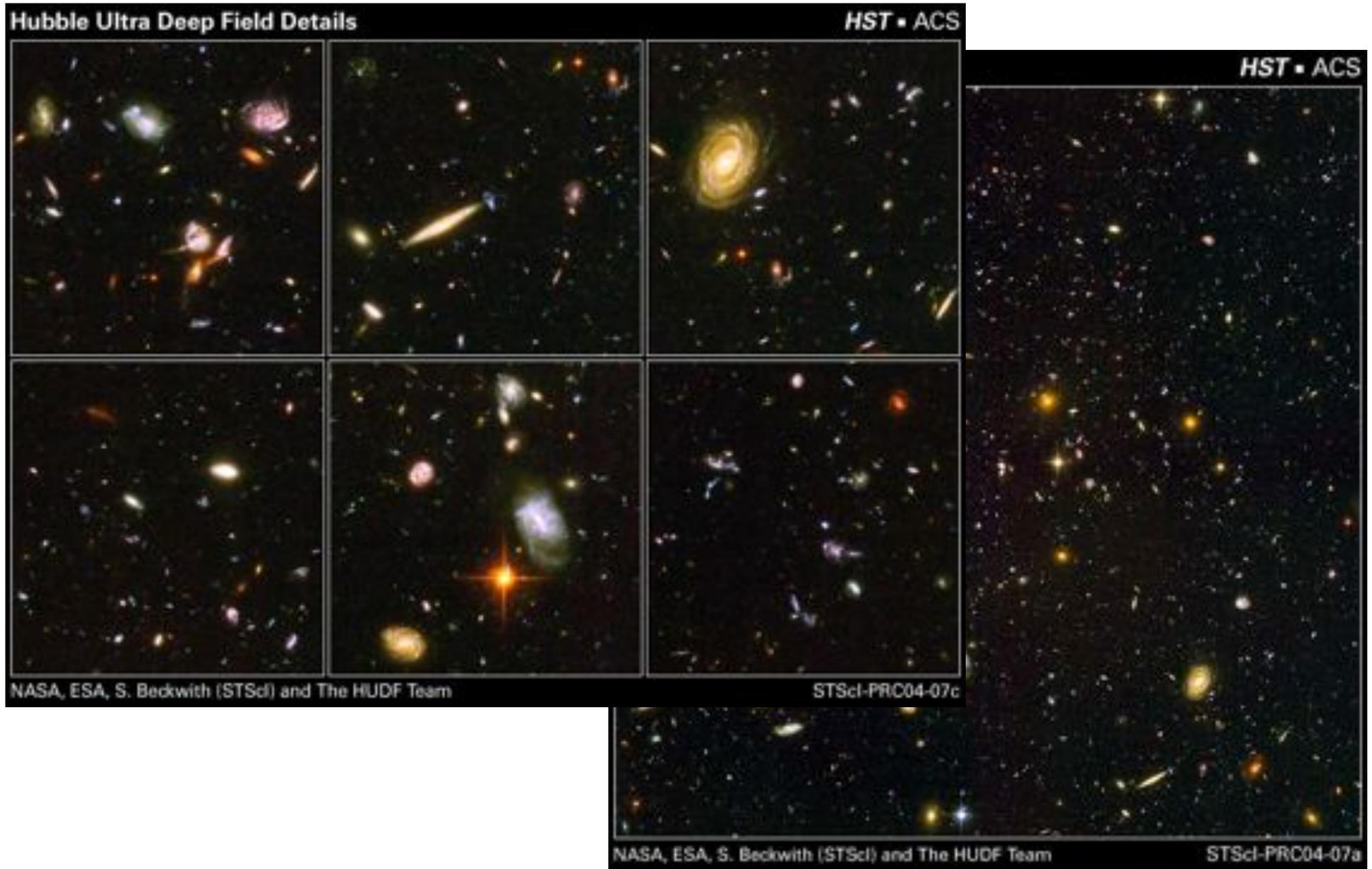
Fig. 2. Power spectra of disk-integrated photometric fluctuations for the Sun: the predicted background signal of model Sun1 (green/grey solid

4. rayonnement extragalactique

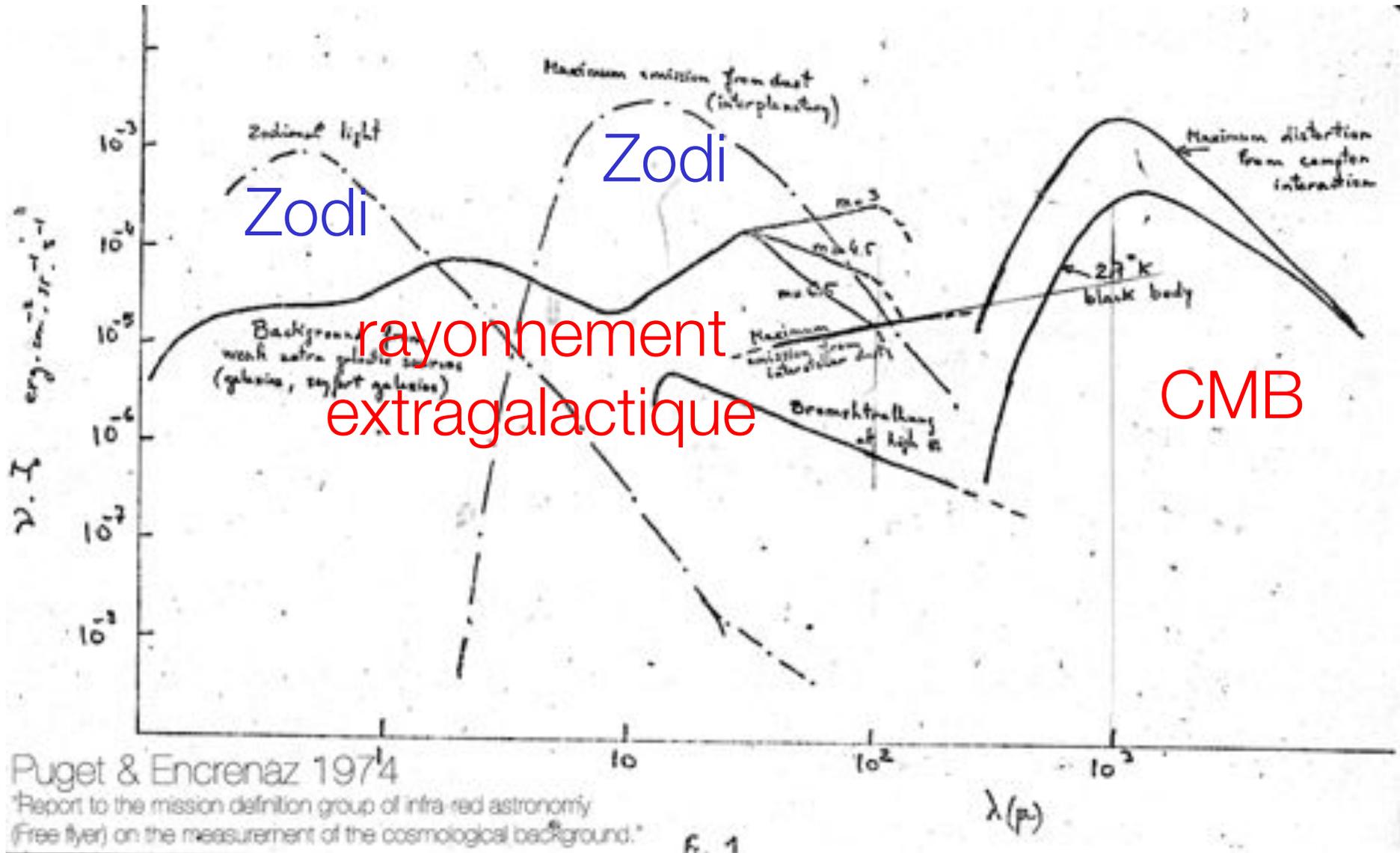
galaxies, galaxies, ...



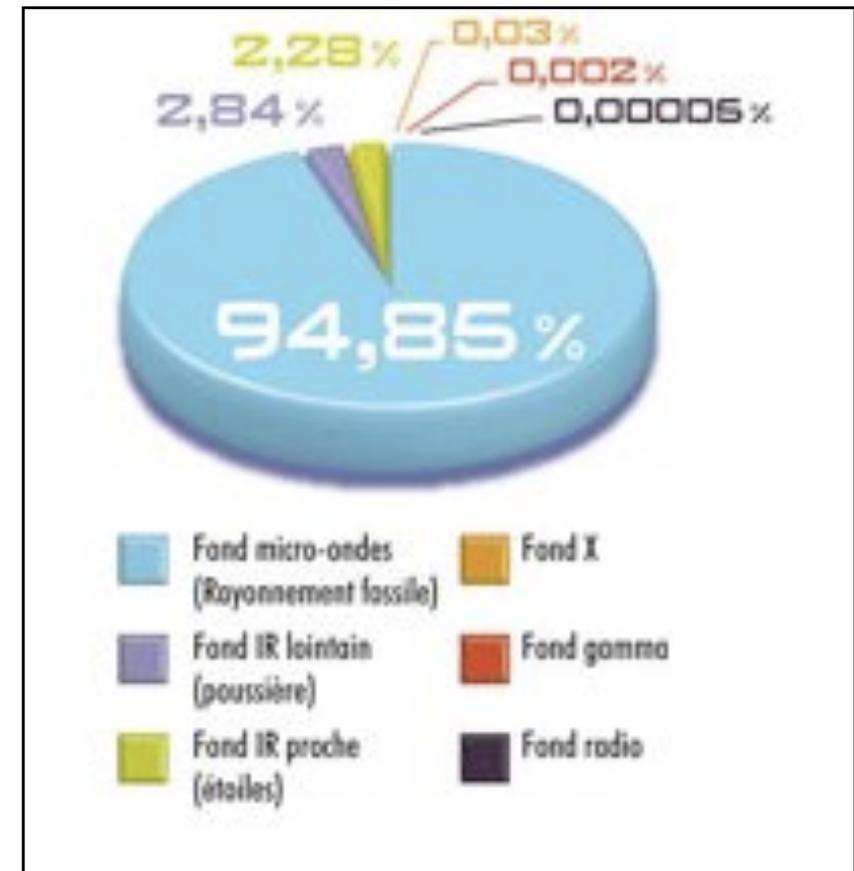
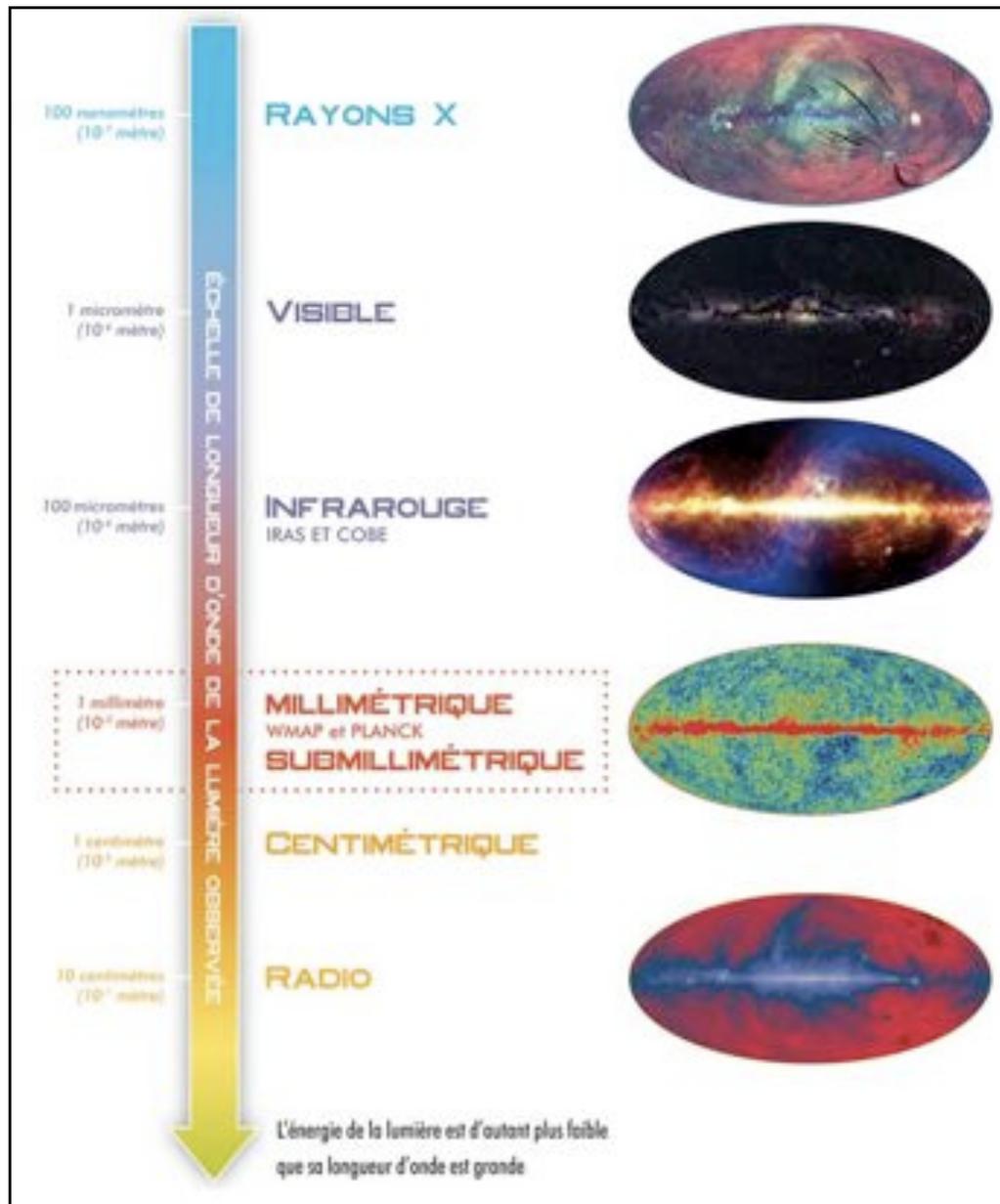
galaxies, galaxies, ...



un long chemin...



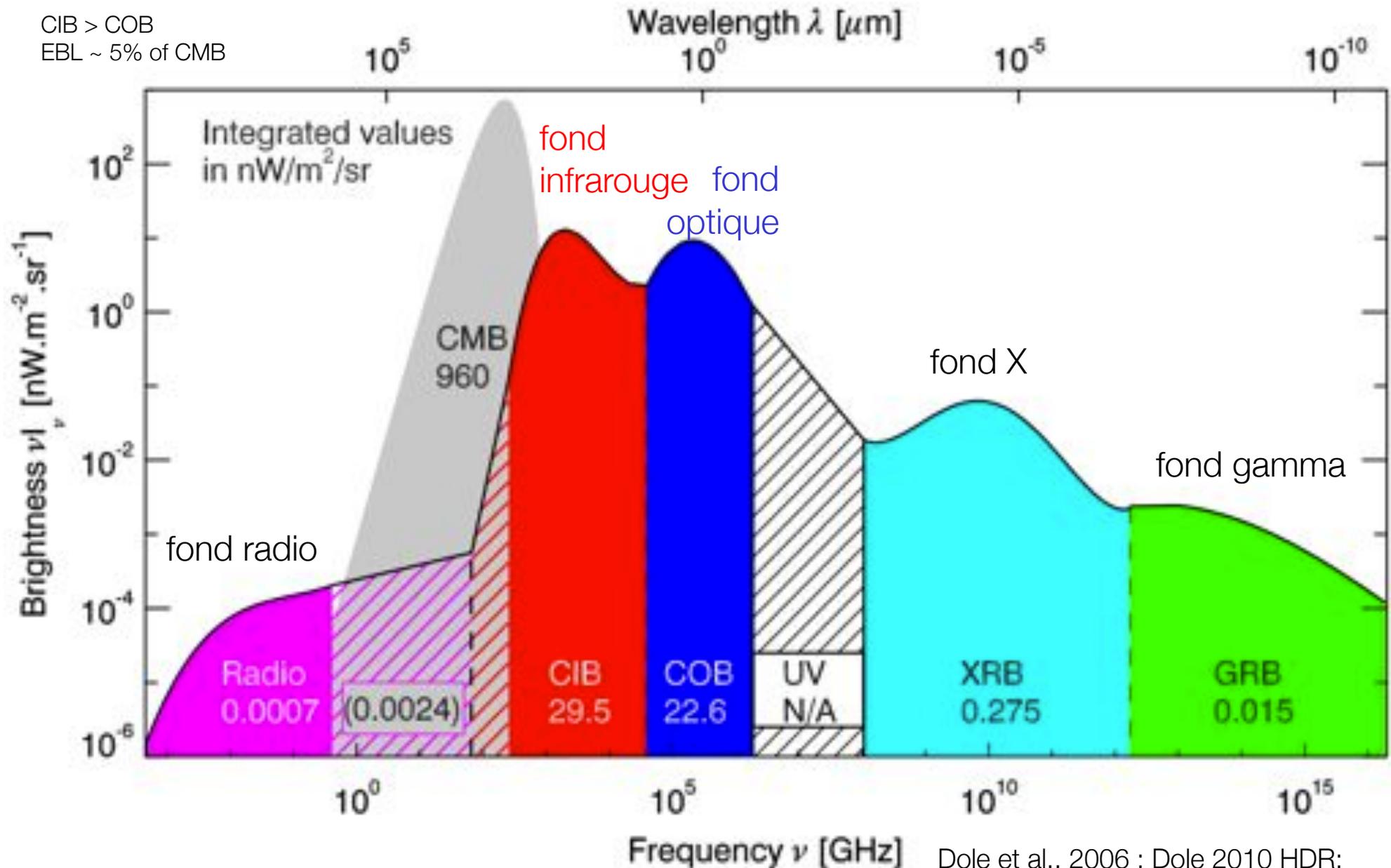
contenu en lumière de l'Univers



Planck Exhibition & H. Dole, 2008
<http://www.planck.fr>

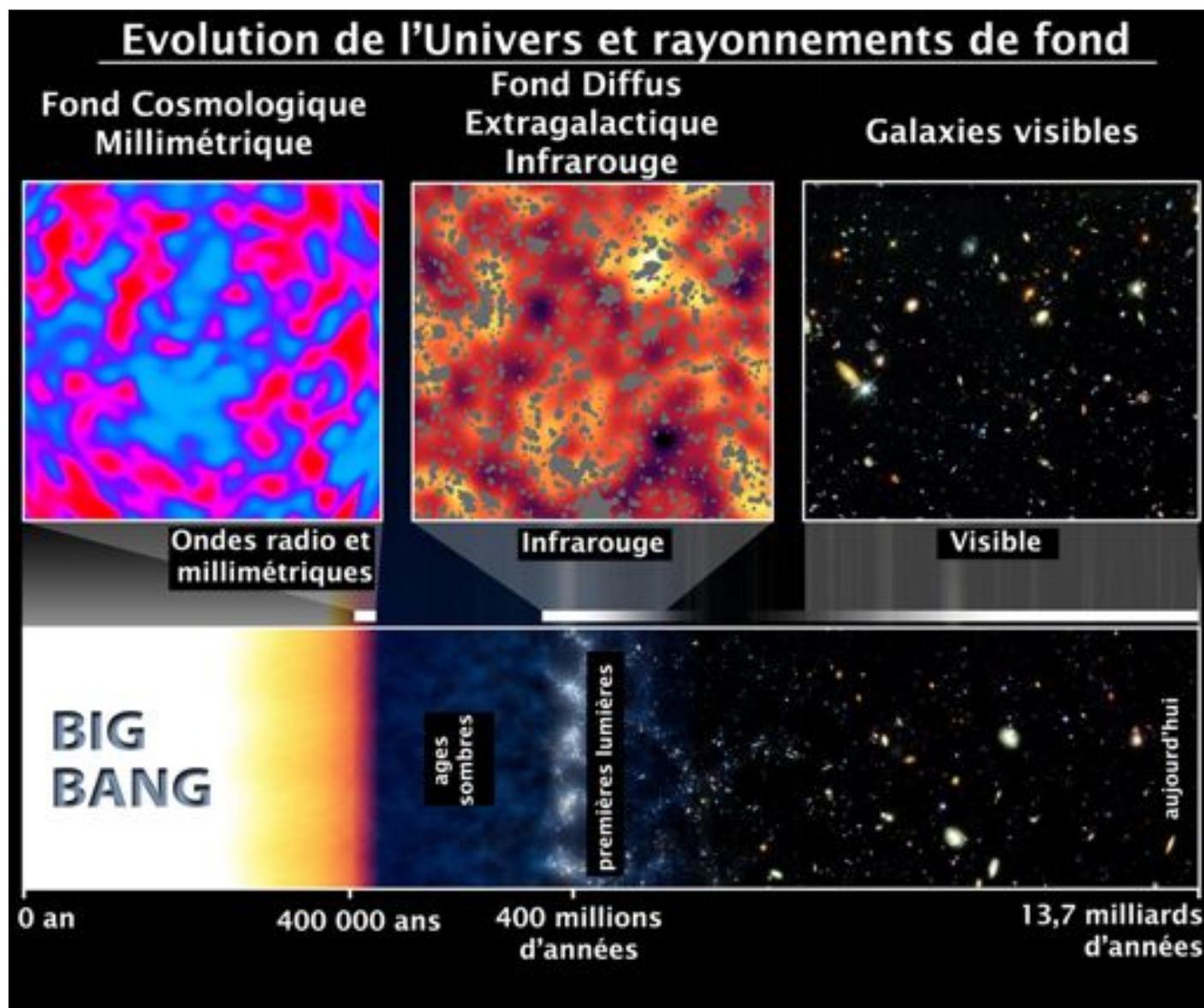
résumé des mesures du fond extragalactique

CIB > COB
EBL ~ 5% of CMB



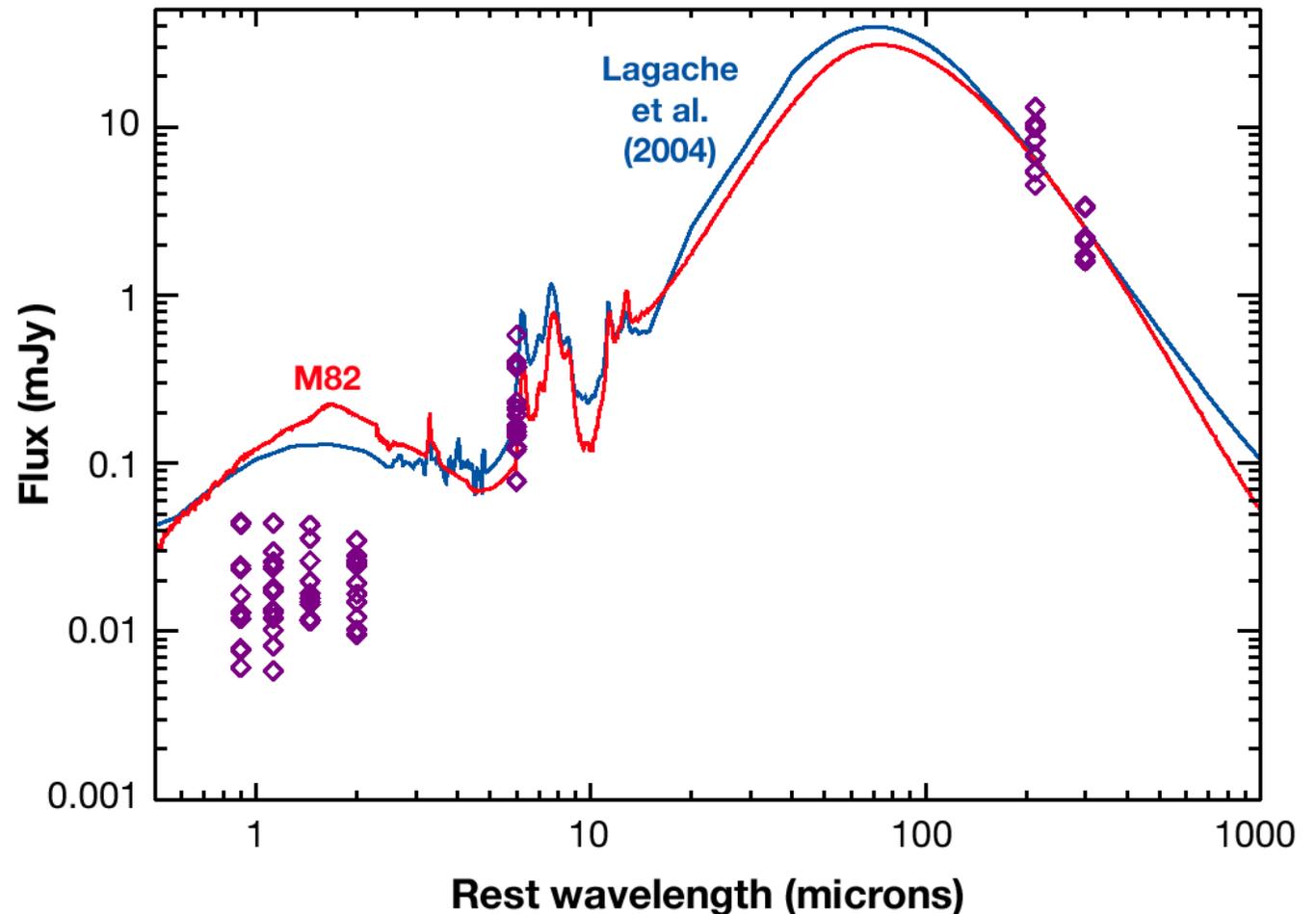
Dole et al., 2006 ; Dole 2010 HDR;
Dole & Bethermin (in prep) 47

vue simpliste des rayonnements de fond



Dole, Lagache Puget 2009, d'après Kashlinsky et al. 2006

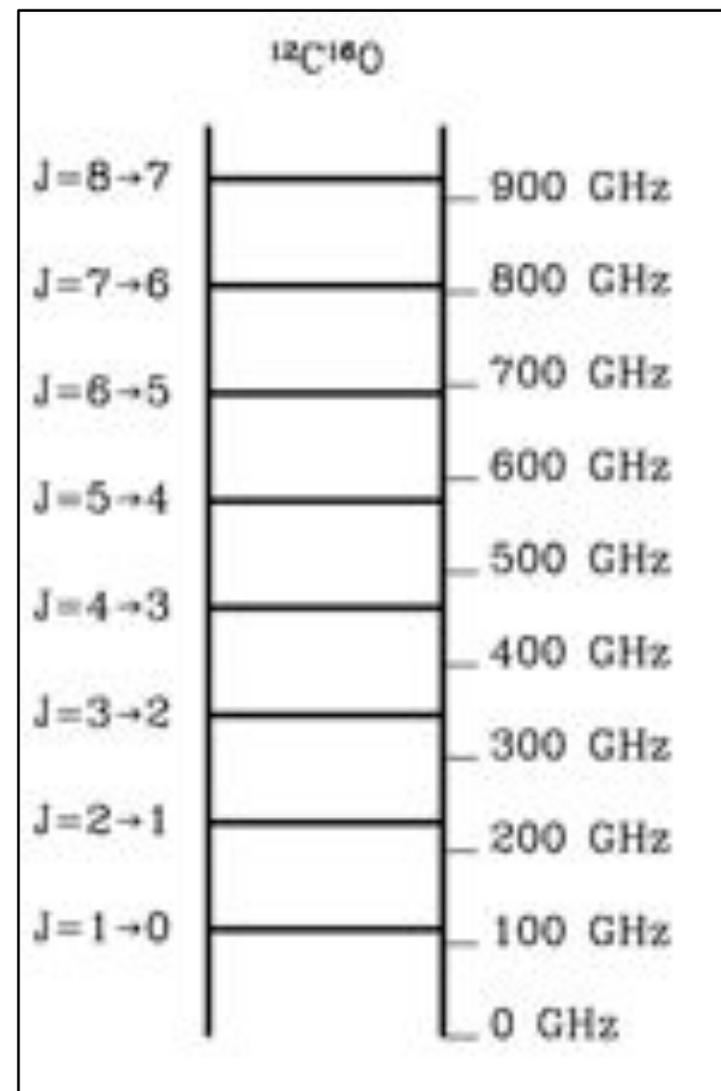
rôle des galaxies redshiftées ?



- voici un spectre typique de galaxie (en bleu)
- est-ce que l'effet de redshift de la partie visible suffit à expliquer le fond infrarouge aux longueurs d'ondes > 100 microns ?

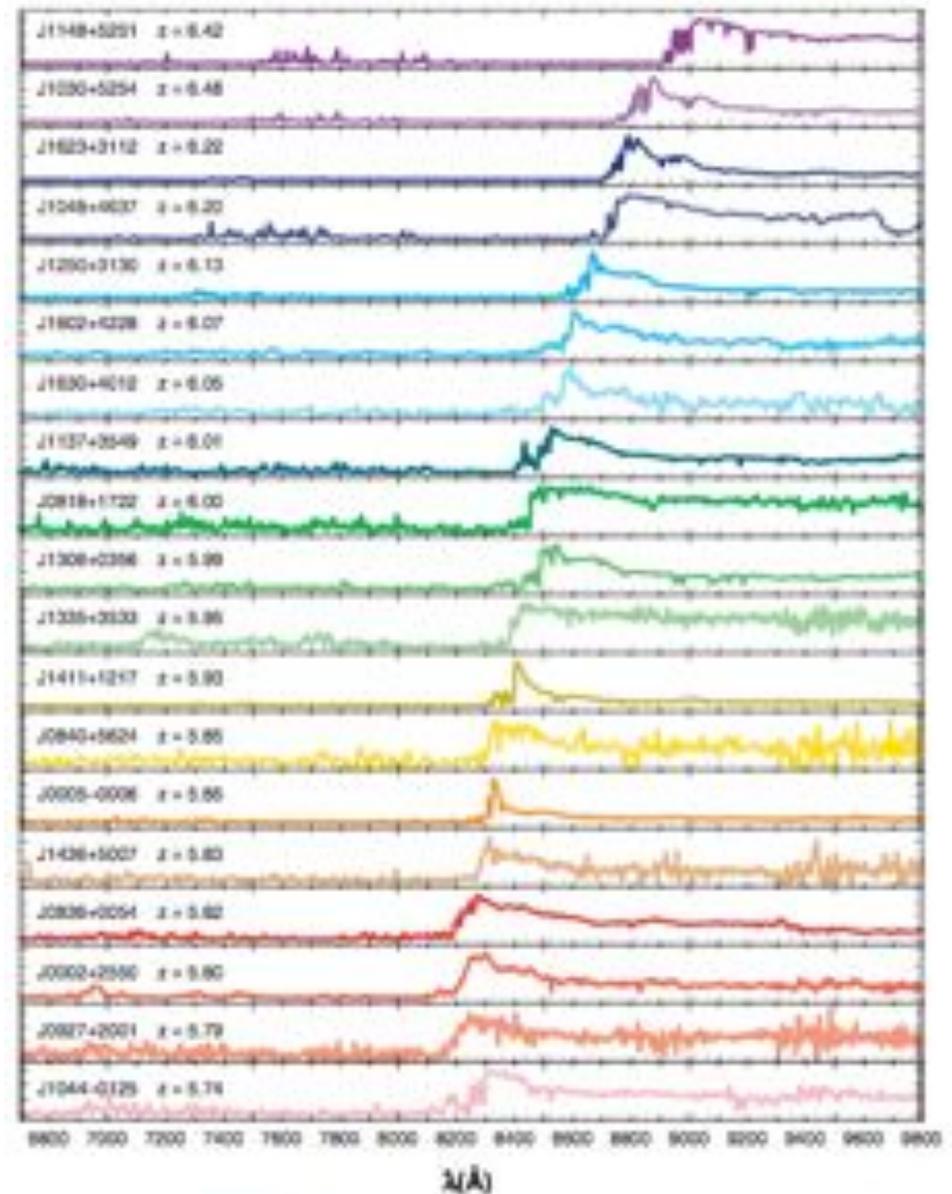
détecter des galaxies lointaines: raies

- raies Ly-alpha et H-alpha
 - Ly-alpha: 121.6 nm (UV)
 - H-alpha 656.3 nm (rouge)
- raies de CO



<http://www.cv.nrao.edu/course/ast534/MolecularSpectra.html>

détecter les galaxies lointaines: discontinuités

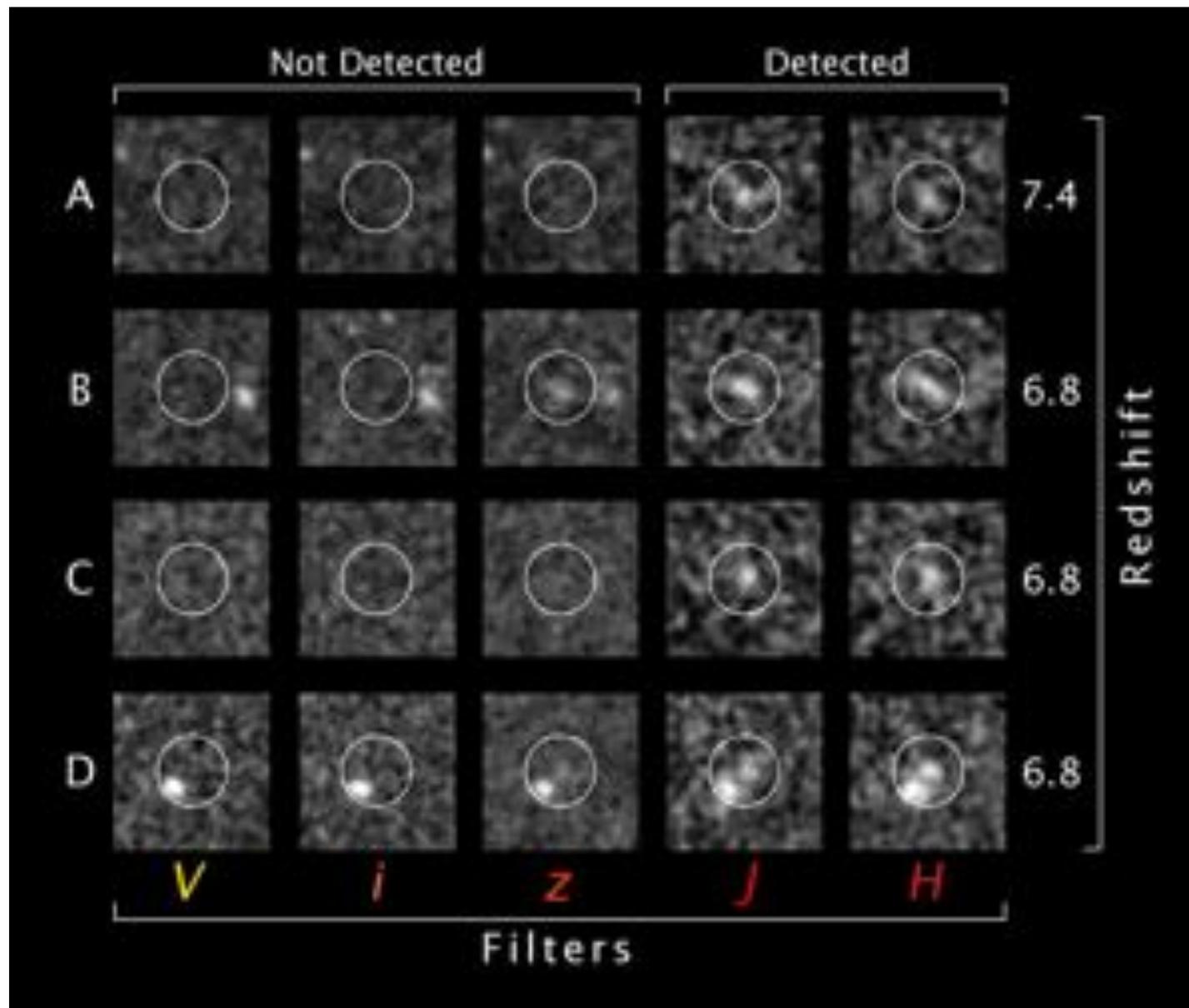


Fan, 2006, ARAA

Figure 1

Modestly resolution spectra of thirteen SDSS quasars at $5.74 < z < 6.42$. Adapted from Fan et al. (2006b).

détecter les galaxies lointaines: discontinuités



exercice: raies décalées

Exercice 2 Observation du redshift

On fait l'hypothèse qu'un spectromètre (tel que ceux installés au VLT, Chili) observe entre les longueurs d'ondes $\lambda_{\min} = 0.5\mu\text{m}$ et $\lambda_{\max} = 0.9\mu\text{m}$.

Les astrophysiciens veulent observer dans les galaxies les raies d'émission de l'hydrogène, en particulier :

- Lyman α à $\lambda_{Ly\alpha} = 0.1216\mu\text{m}$
- Balmer $H\alpha$ à $\lambda_{H\alpha} = 0.6563\mu\text{m}$

1- A quel domaine de redshifts $z_{Ly\alpha}$ sera sensible le spectromètre en observant la raie Lyman α ?

2- Même question pour $z_{H\alpha}$ avec la raie $H\alpha$.

5. résumé des connaissances et des grandes questions

résumé des connaissances actuelles

scénario du Big Bang

- Univers primordial: dense et chaud
- Univers en expansion
 - Avec épisode d'inflation au début
 - Expansion accélérée aujourd'hui
- Présence d'un rayonnement isotrope de corps noir
- Abondance des éléments légers

le fond cosmologique

- Rayonnement isotrope
- Corps noir $T=2.725\text{K}$
- Dernière surface de diffusion, $z=1100$, quand $T\sim 3000\text{K}$
- Infimes fluctuations (10^{-5}): graines des grandes structures d'aujourd'hui (amas de galaxies)
- **histoire de l'Univers jeune**

le fond extragalactique

- Rayonnement 50 fois moins intense
- maximum dans l'infrarouge lointain
- **histoire des galaxies**

(parmi) les grandes questions

évolution de notre Univers

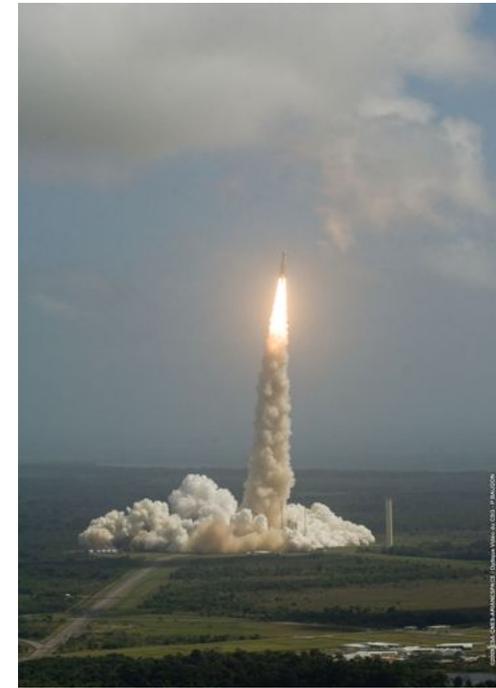
- Comment s'est déroulée l'inflation ?
- Qu'est-ce que l'énergie noire ?
- Comment évolue-t-elle avec le temps ?
- Qu'est-ce que la matière noire ?

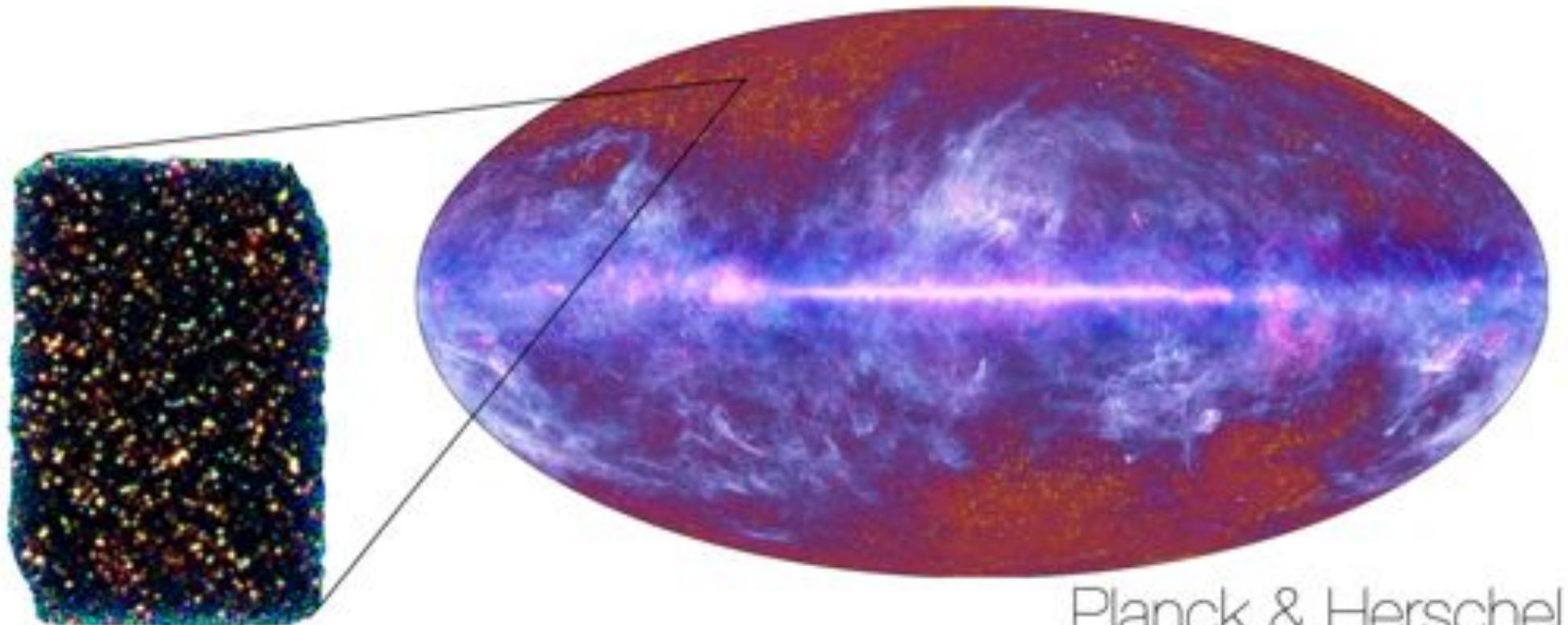
évolution des structures

- Comment se forment les premières galaxies ?
- Comment a eu lieu la réionisation ?
- Comment s'agrègent les amas de galaxies ?
- Comment les galaxies se forment-elles dans les halos de matière noire ?

réponses avec: fond extragalactique, fond cosmologique, et relevés de galaxies

6. l'apport de Planck et Herschel





Planck & Herschel
© Planck ESA, HI & LFI/ESA/IRAM, © Herschel ESA/INCF & SPIRE & PACS/ESA/IRAM

GOODS-Herschel

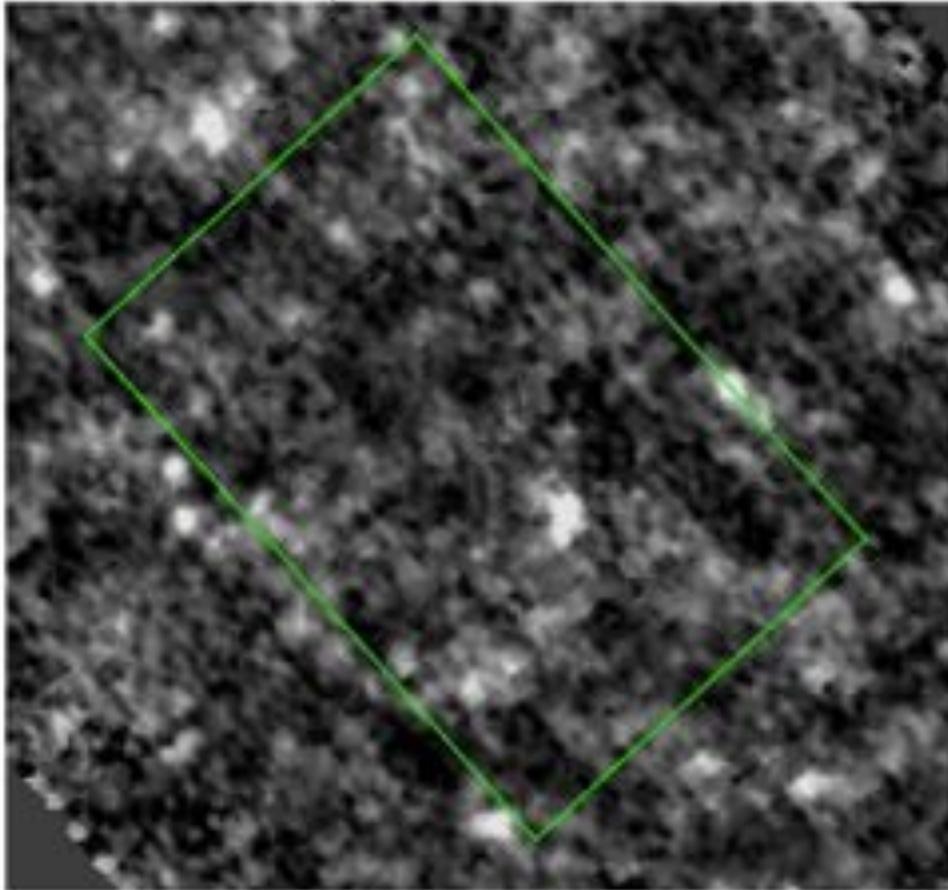
~250 to 500 x + sensible que Planck
 PACS – SPIRE
 70 – 500um
 4.2 THz – 600 GHz
 6 bandes de fréquence

Planck

~6500 x + de surface de ciel que GOODS
 HFI – LFI
 350um – 3mm – 1 cm
 857 GHz – 100 GHz – 30 GHz
 9 bandes de fréquence

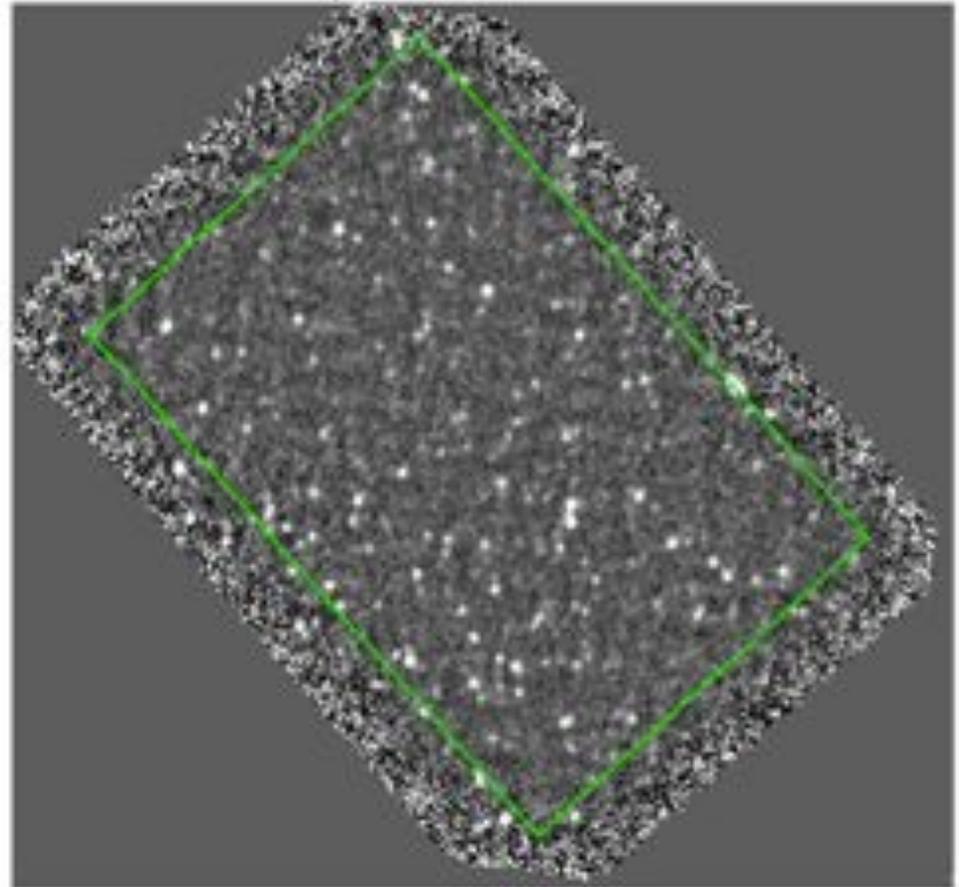
résolution du fond en galaxies

GOODS-N 160 μ m



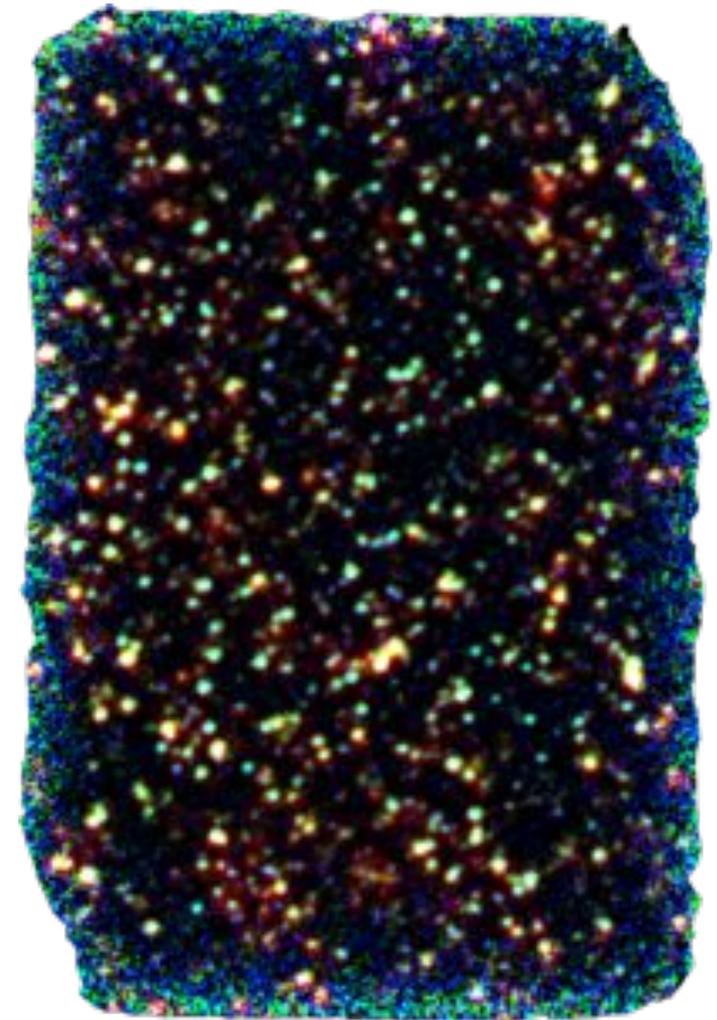
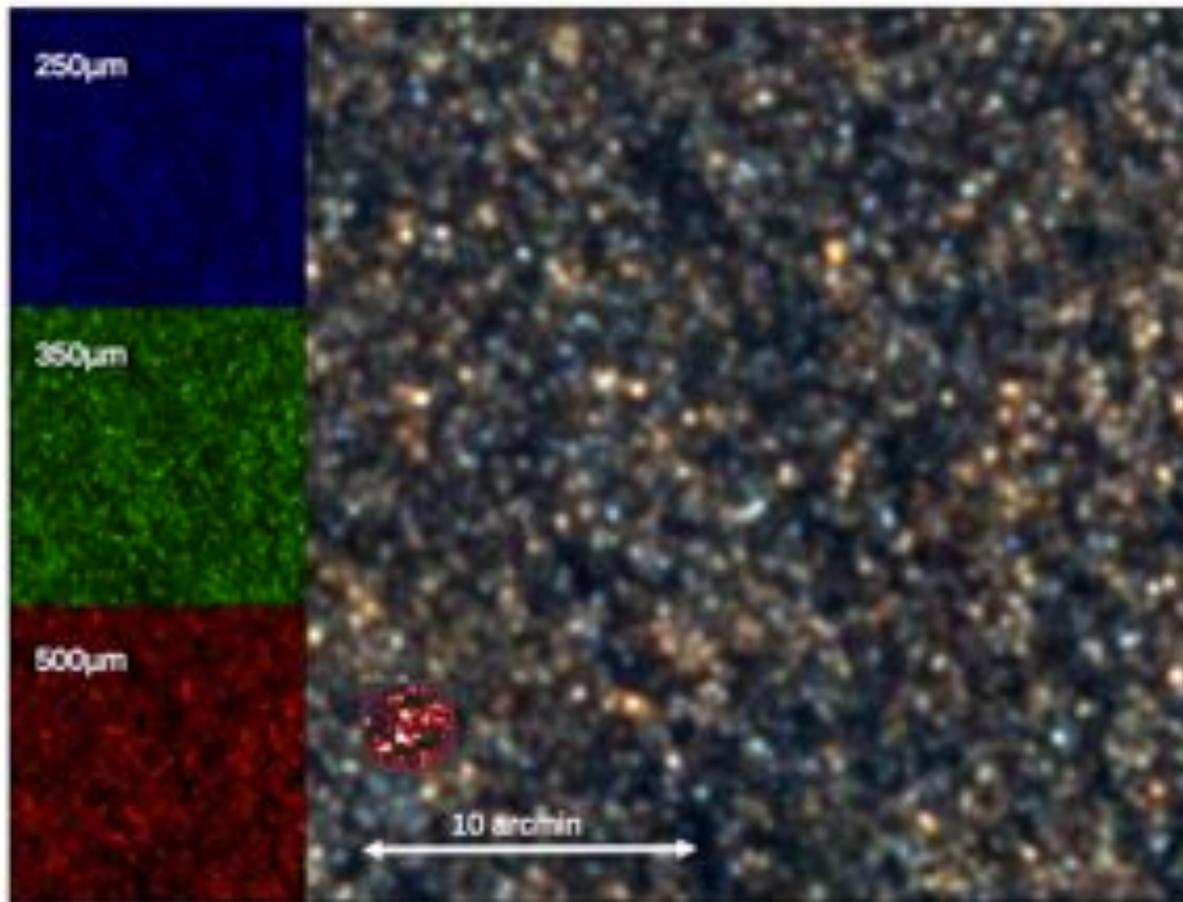
Spitzer MIPS 160um
FIDEL

GOODS-N 160 μ m



Herschel PACS 160um
PEP

résolution du fond en galaxies

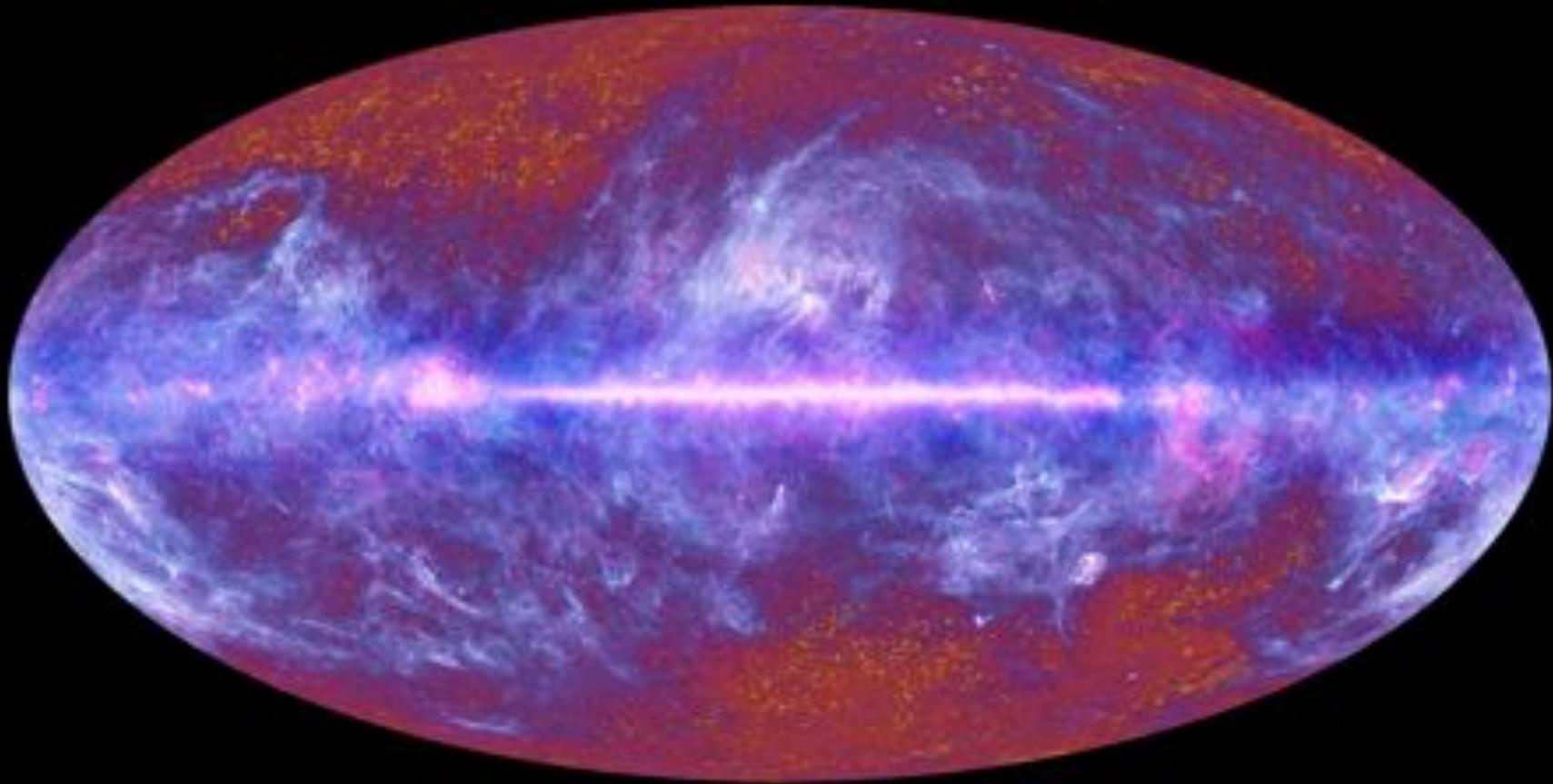


courtoisie D. Elbaz et GOODS-H team

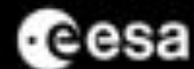
PACS 100, 160 & SPIRE 250um – GOODS-H

Herschel SPIRE 250, 350 & 500um – HERMES

statistique sur tout le ciel

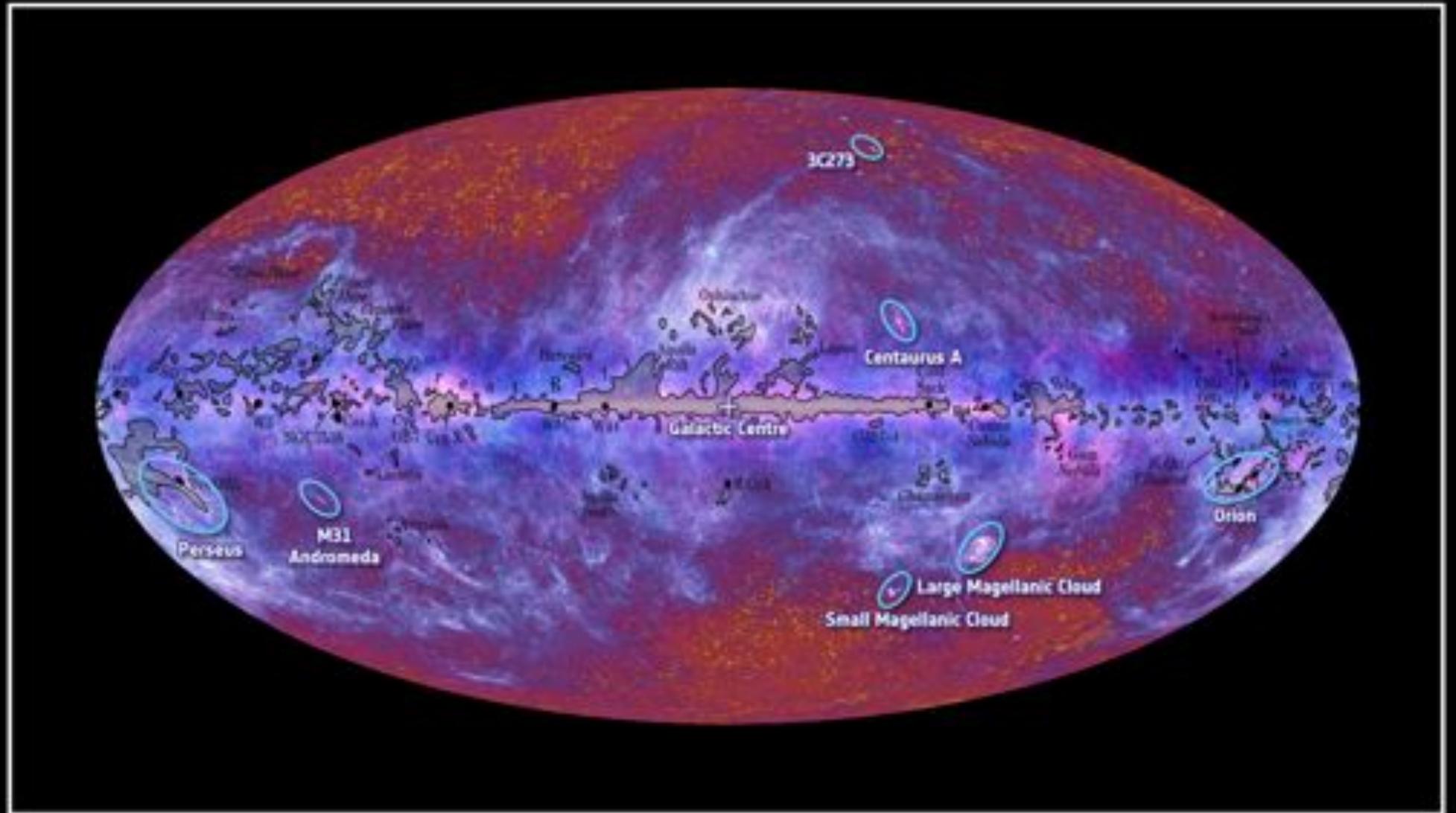


The Planck one-year all-sky survey

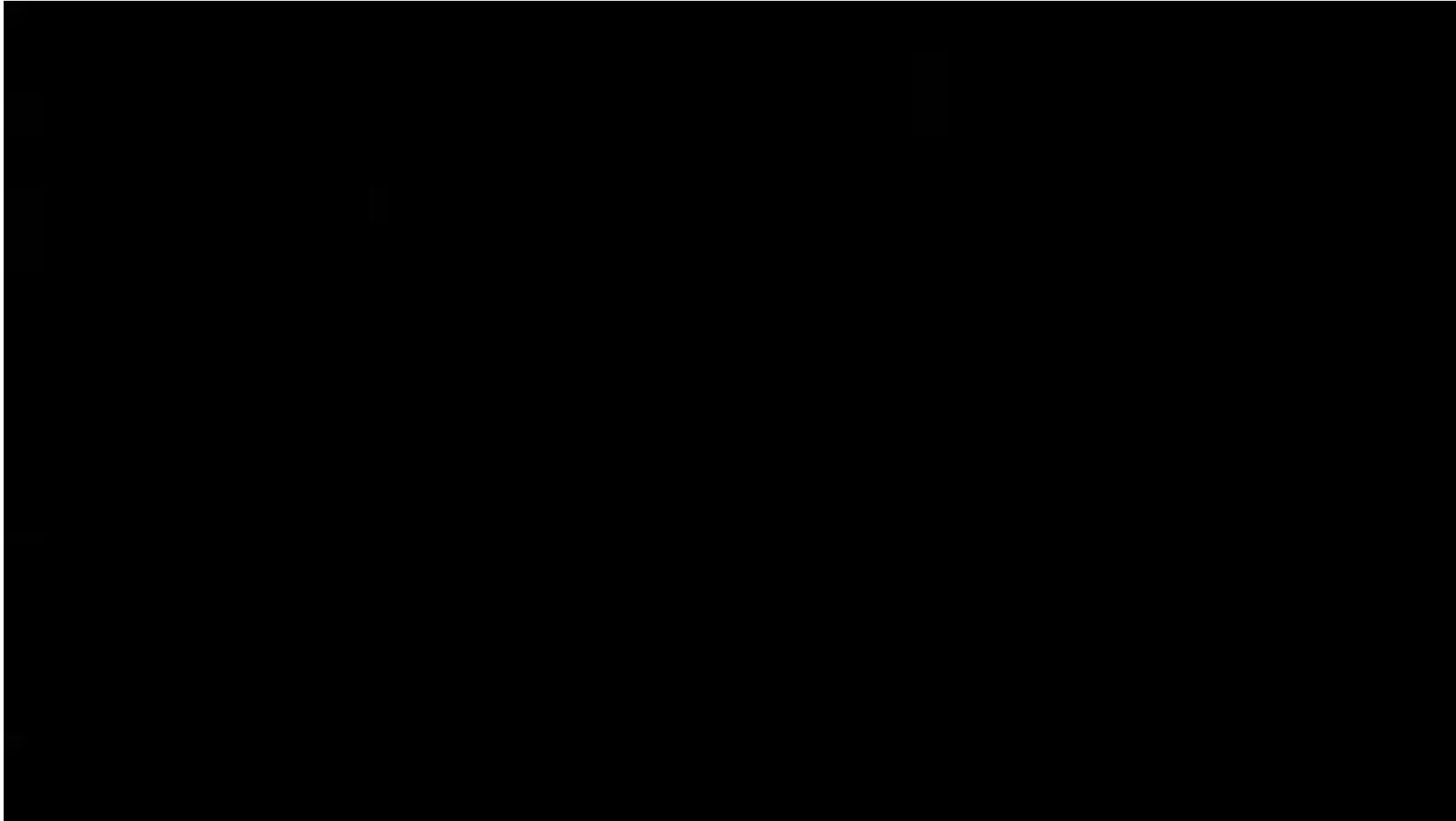


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

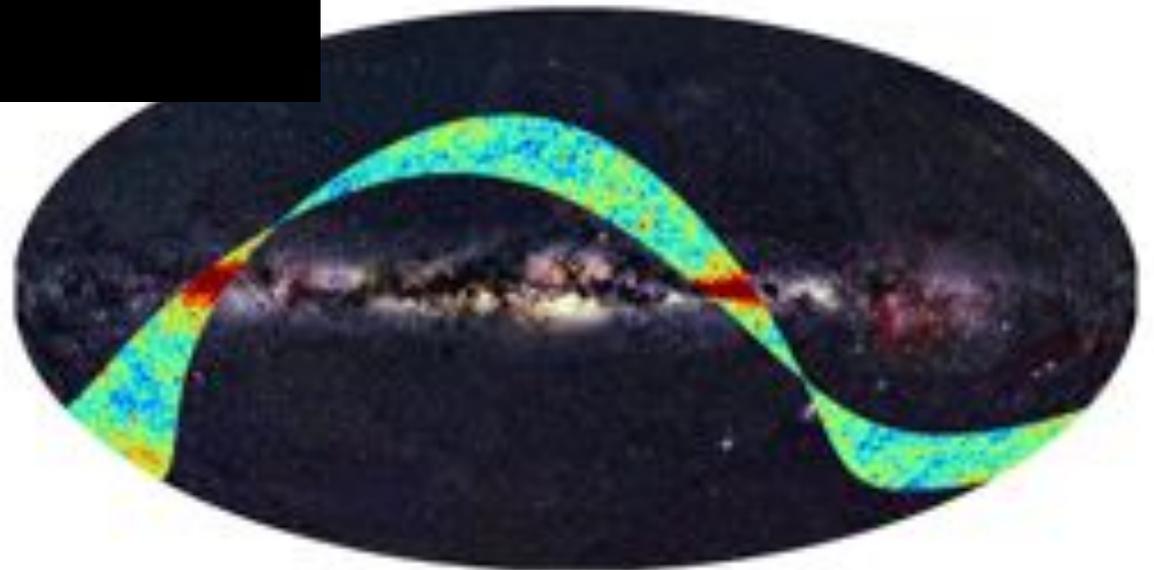
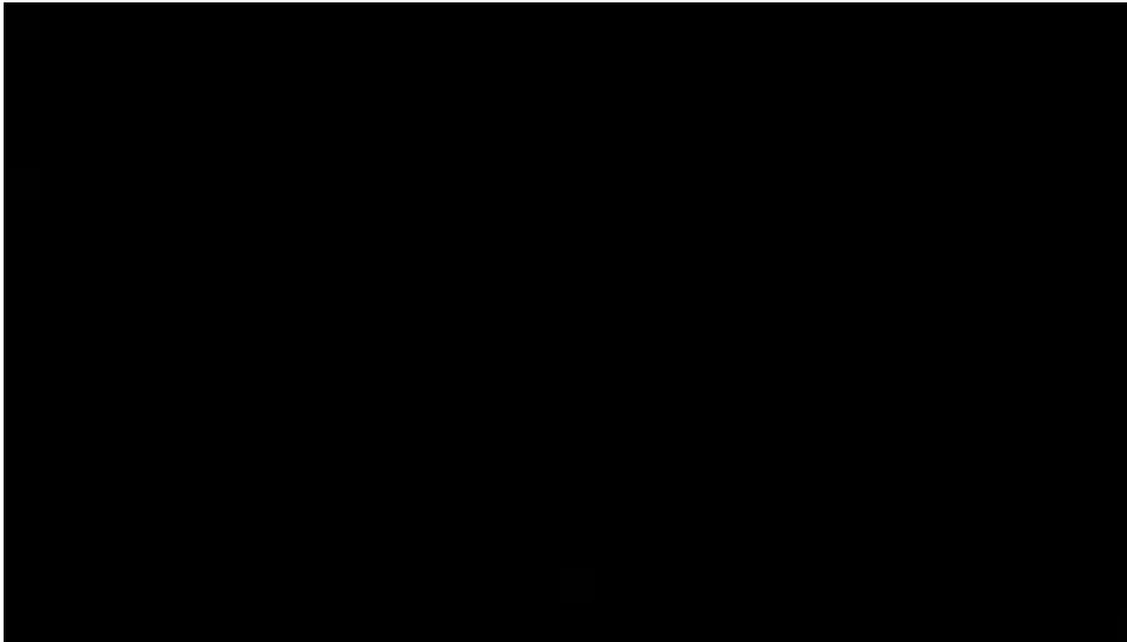
statistique sur tout le ciel



Planck détecte des milliers de galaxies



premières images publiques de Planck



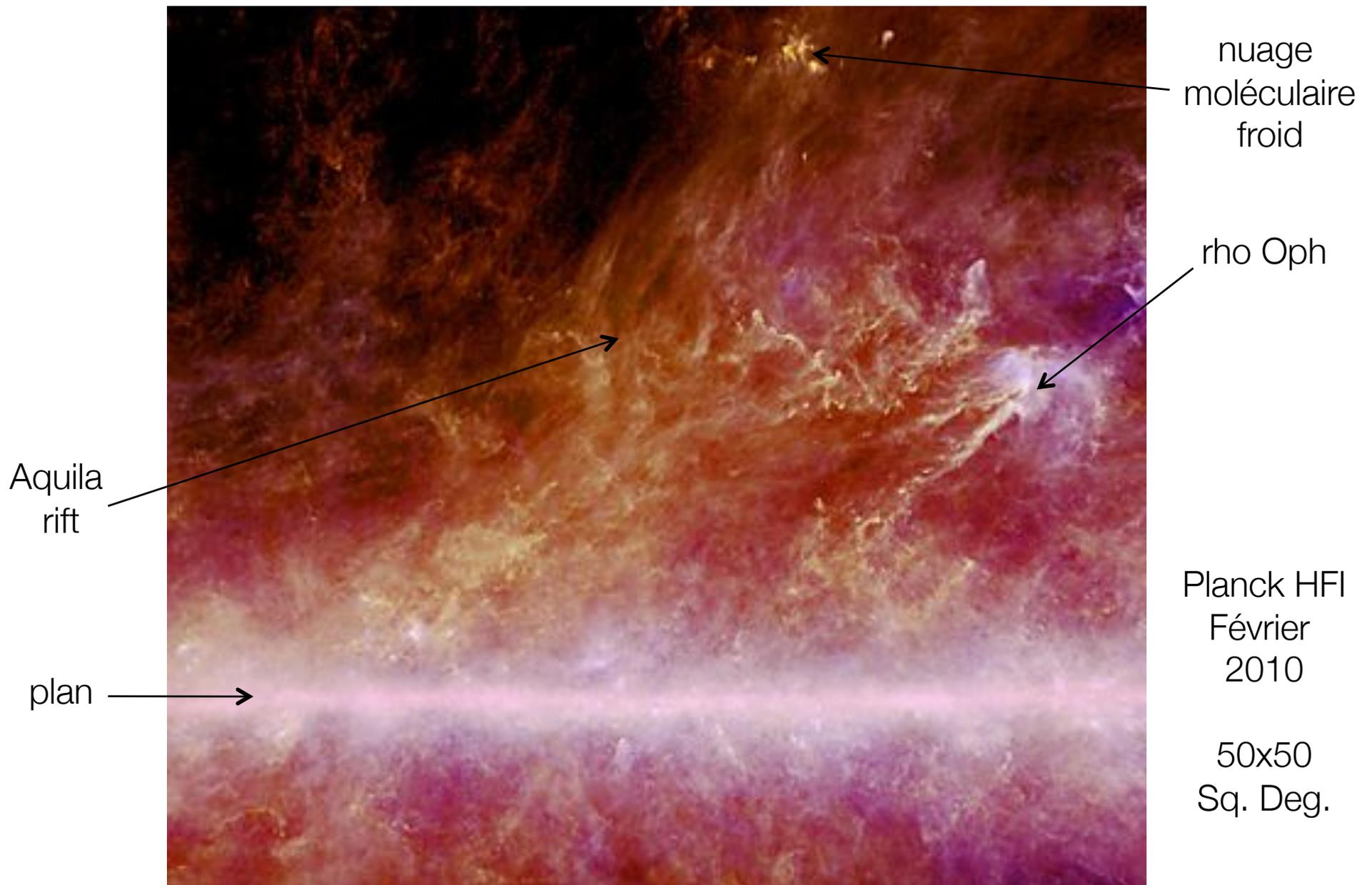
Planck First Light Survey – HFI – Septembre 2009

opérations quotidiennes Planck à Orsay



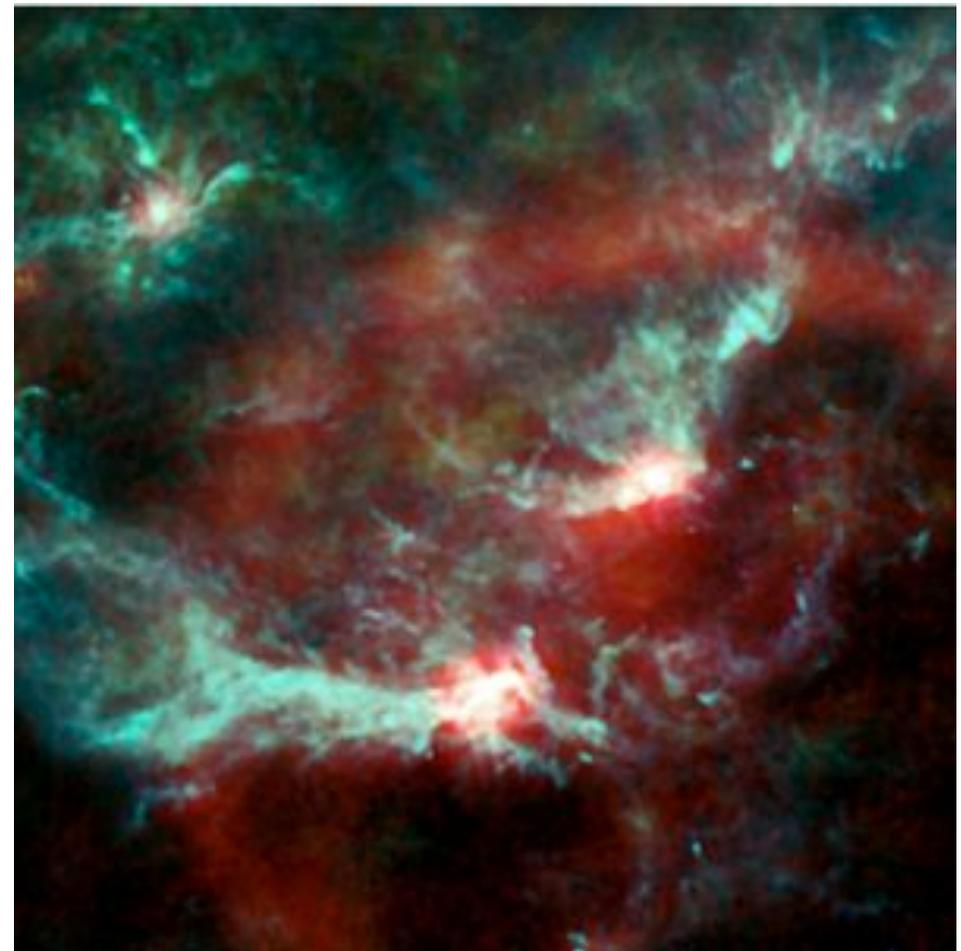
Planck HFI – Instrument Operation Room – Institut d’Astrophysique Spatiale

premières images publiques de Planck



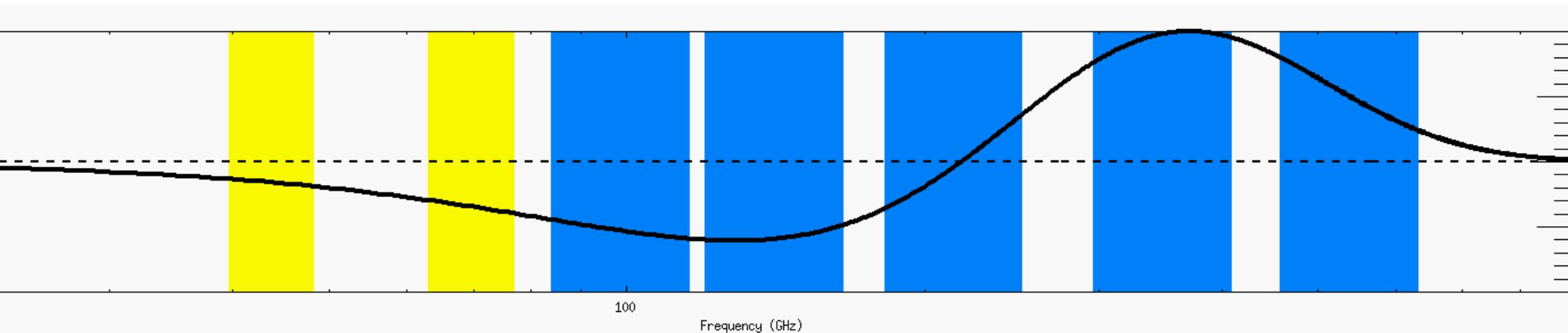
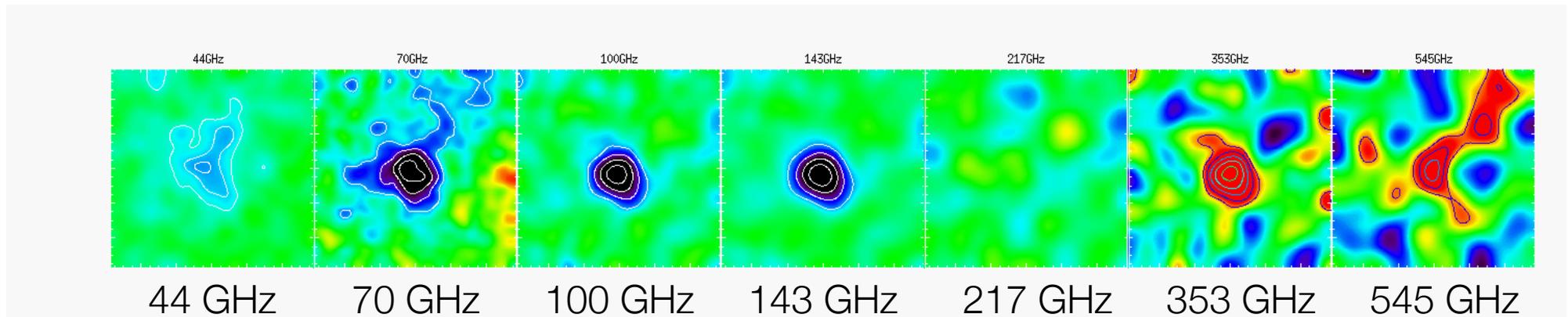
premières images publiques de Planck

Planck HFI - Mars 2010 - Orion



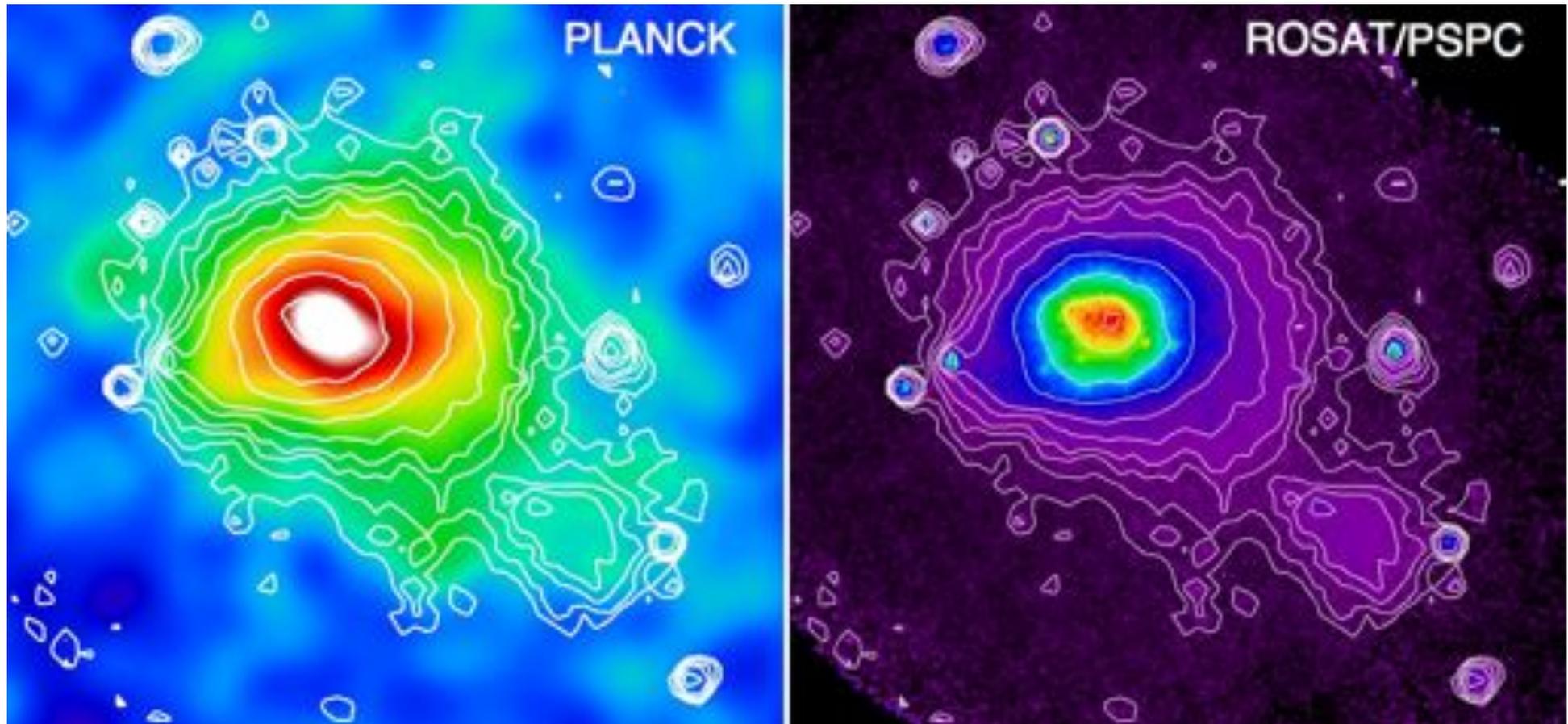
known clusters revealed by SZ [1]

A2319

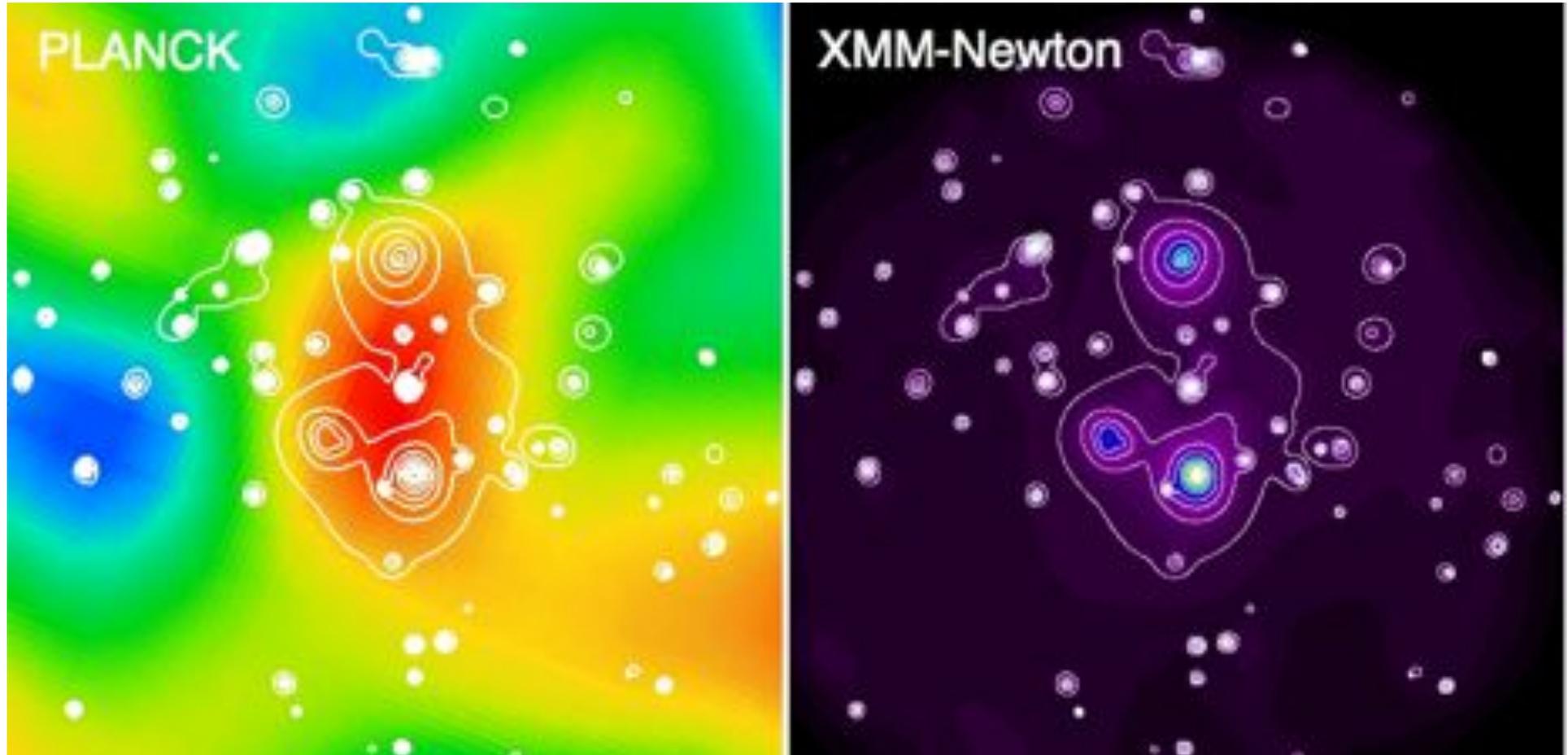


known clusters revealed by SZ [2]

Coma

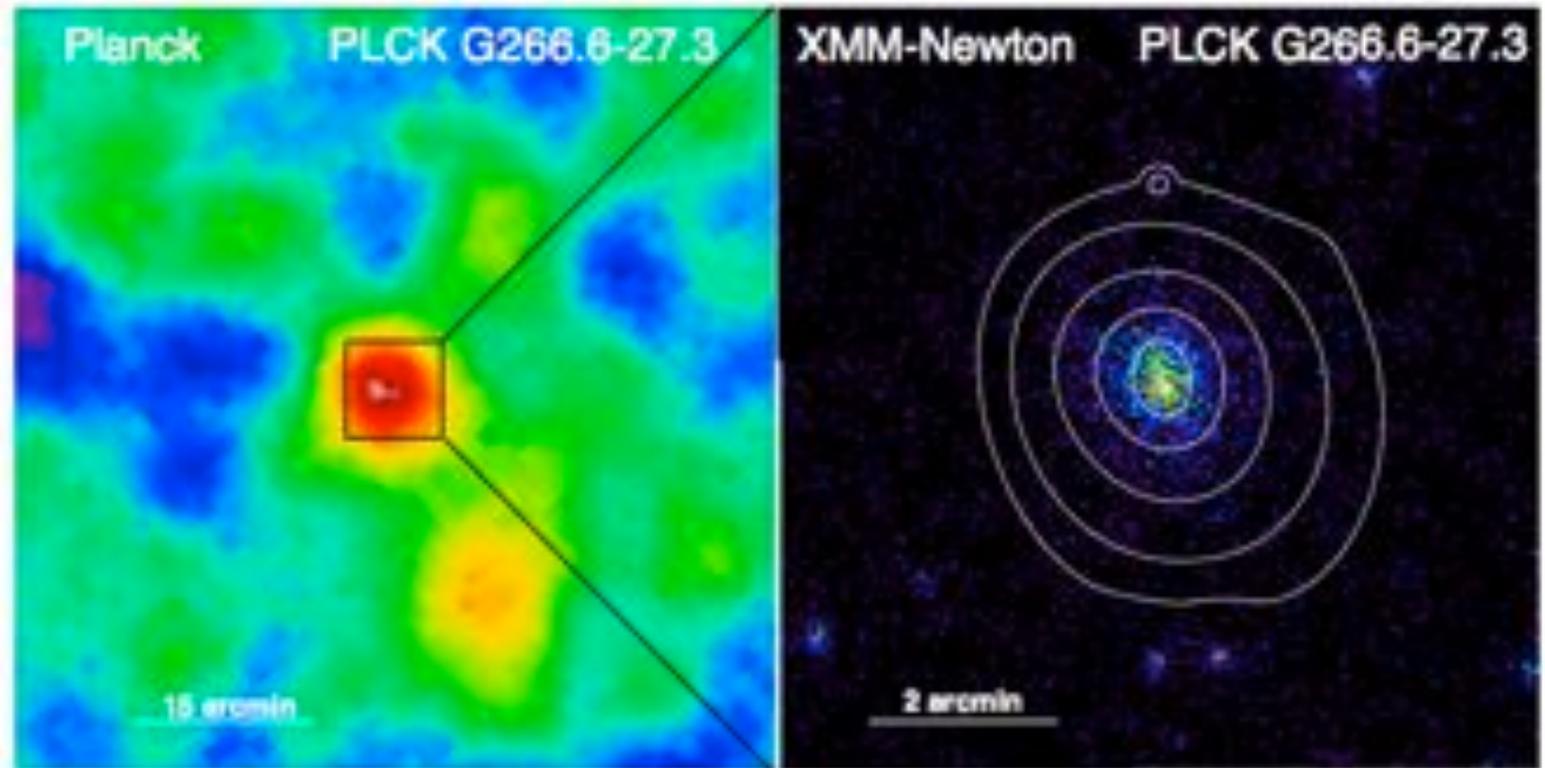


new (super) clusters discovered with SZ !



(c) ESA / Planck HFI & LFI consortia & XMM

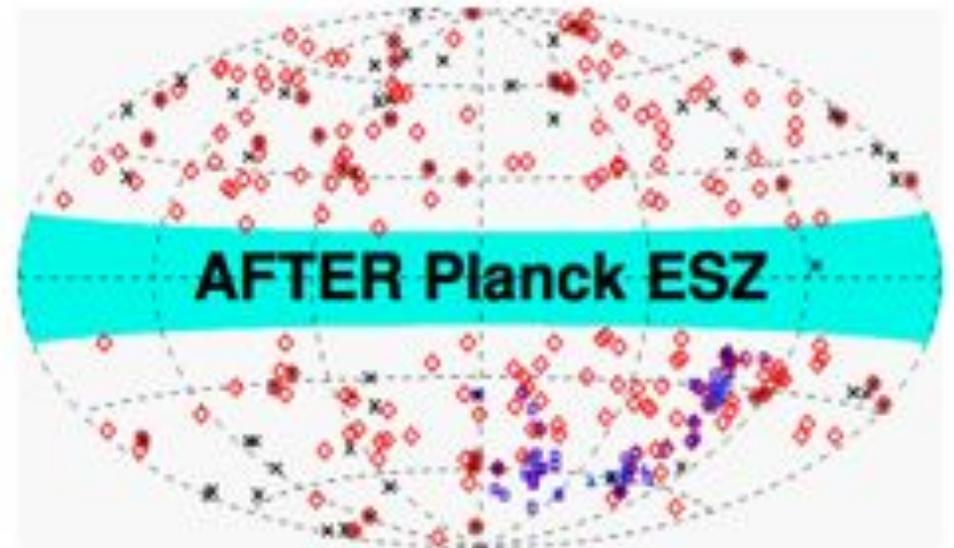
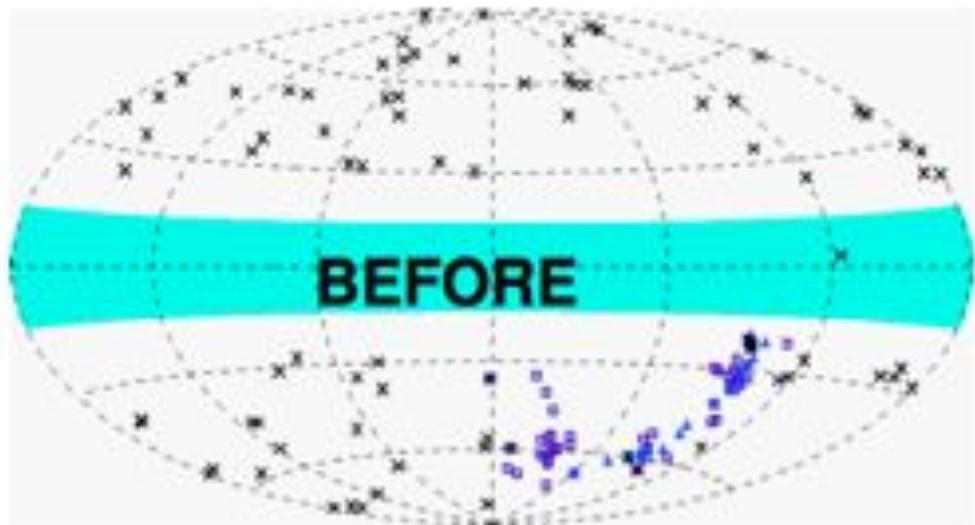
amas à $z \sim 1$



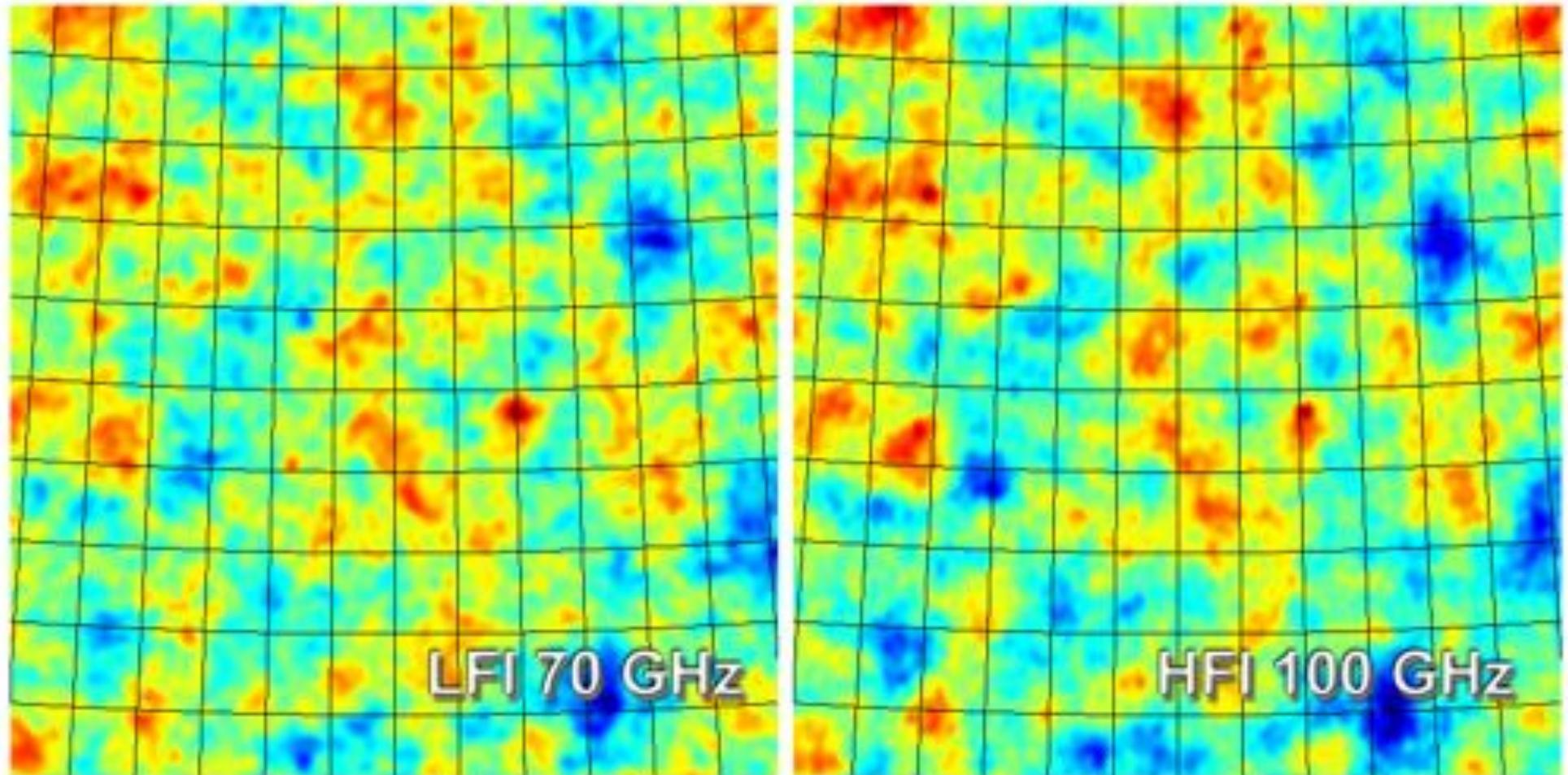
We present first results on PLCK G266.6–27.3, a galaxy cluster candidate detected at a signal-to-noise ratio of 5 in the *Planck* All Sky survey. An *XMM-Newton* validation observation has allowed us to confirm that the candidate is a *bona fide* galaxy cluster. With these X-ray data we measure an accurate redshift $z = 0.94 \pm 0.02$ and estimate the cluster mass to be $M_{500} = (7.8 \pm 0.8) \times 10^{14} M_{\odot}$. PLCK G266.6–27.3 is an exceptional system: its luminosity of $L_X[0.5-2.0\text{keV}] = (1.4 \pm 0.05) \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ equals that of the two most luminous known clusters in the $z > 0.5$ universe, and it is one of the most massive clusters at $z \sim 1$. Moreover, unlike the majority of high redshift clusters, PLCK G266.6–27.3 appears to be highly relaxed. This observation confirms *Planck*'s capability to detect high redshift, high mass clusters, and opens the way to the systematic study of population evolution in the exponential tail of the mass function.

Planck Collaboration, 2011, arXiv:1106.1376

amas: apport de Planck



Planck observe à haute latitude Galactique

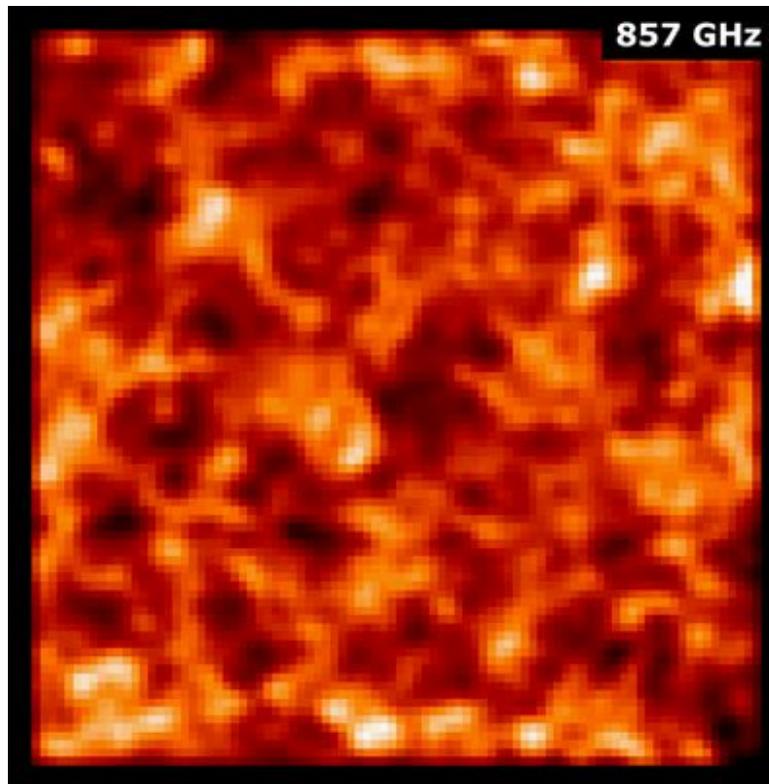
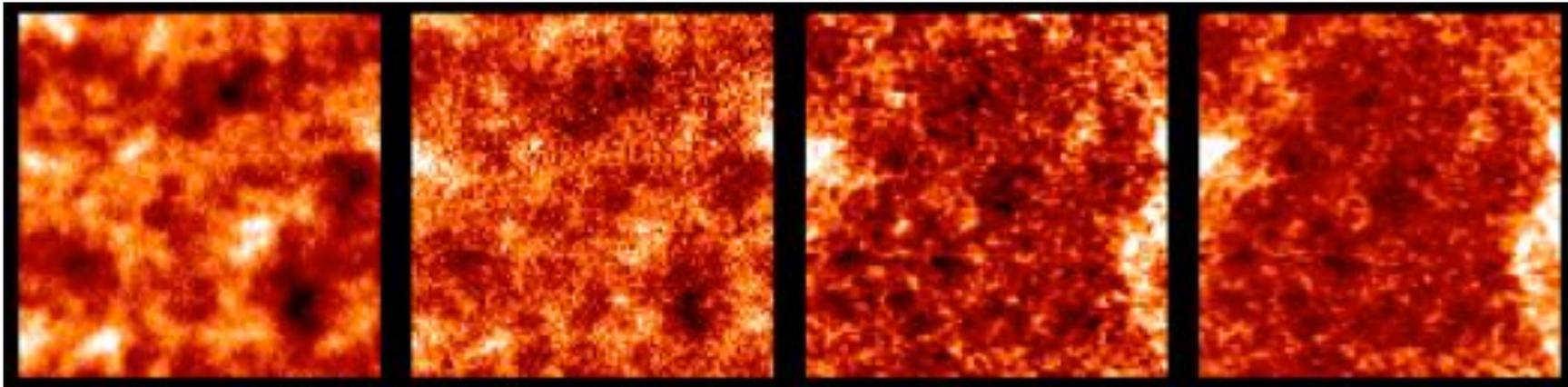


LFI à 70 GHz

HFI à 100 GHz

Échelle des températures: environ 100 microK

la structure du fond infrarouge



structures visibles

- échelles \leq degré
- partiellement corrélées en fréquence

Planck Collaboration, 2011, arXiv:1101.2028

conclusion

rayonnement extragalactique

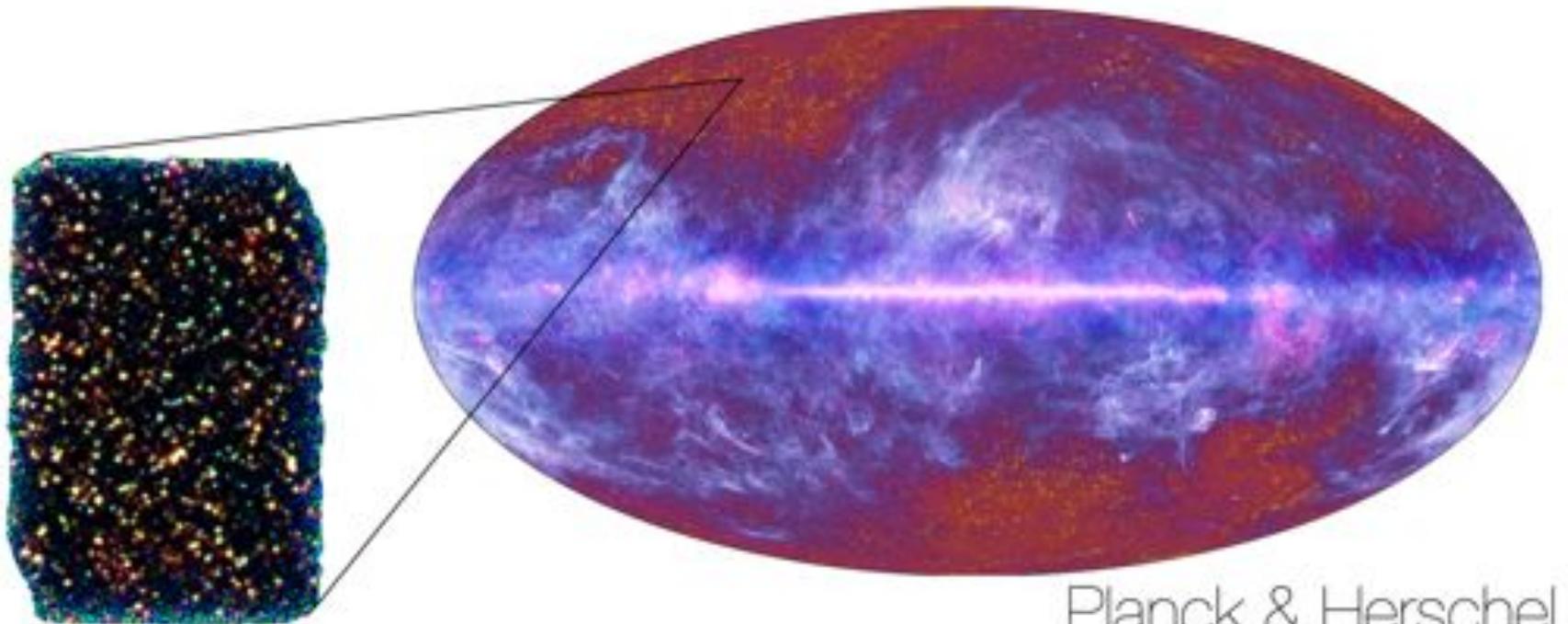
- encode l'[histoire](#) du rayonnement des galaxies
- est mesuré sur plus de 20 ordres de grandeur en fréquence
 - est maximum en infrarouge lointain (vers 160um)
 - importance des [phases infrarouge des galaxies](#) (lien avec formation d'étoiles)
 - raynt extrag: ~ 50 nW/m²/sr, à comparer à ~ 1000 pour le CMB
- histoire des galaxies avec [Herschel](#)
- structure du fond cosmologique et extragalactique avec [Planck](#)
- relevés de galaxies (sol et espace)

-> mieux comprendre l'origine de l'Univers, et la formation des galaxies et des amas.

merci

<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>

<http://www.planck.fr>



Planck & Herschel

© Planck Collaboration & ESA/Herschel. All rights reserved. 2013

quelques références

- *pourquoi la nuit est-elle noire ?* **J-M Alimi**, 2002, petites pommes du savoir
- *Initiation à la cosmologie*, **M Lachièze-Rey**, Masson
- *Astronomie Astrophysique Introduction*, **A. Acker**, Dunod
- *Retour sur le paradoxe d'Olbers*, **A. Riazuelo**, 2005, <http://www.planck.fr/article383.html>
- *Pourquoi la nuit est-elle noire?* **J-M Levy-Leblond**, 2008, <http://www.fermedesetoiles.com/supports/2008/pourquoi-nuit-est-noire.pdf>
- *Cosmologie primordiale*, **P. Peter et J-P. Uzan**, Belin, 2005
- *La nuit n'est pas noire: le rayonnement de fond extragalactique et l'évolution des galaxies infrarouges*, **H. Dole**, 2010, HDR, <http://www.ias.u-psud.fr/dole/hdr/>
- *Extragalactic Astrophysics and Cosmology: An Introduction*, **P. Schneider**, Springer, 2006.
- *Observational Cosmology*, **S. Serjeant**, Cambridge, 2010
- *Astrophysical Concepts*, **M. Harwit**, 3rd Ed, Springer