

l'Univers comme laboratoire: du Big Bang à nos jours

Hervé Dole

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France

Université Paris Sud & CNRS

Institut Universitaire de France

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

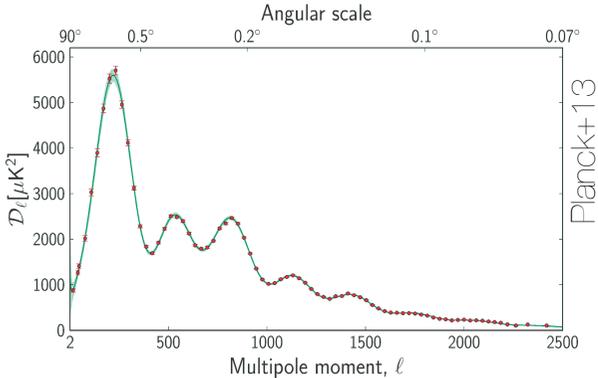
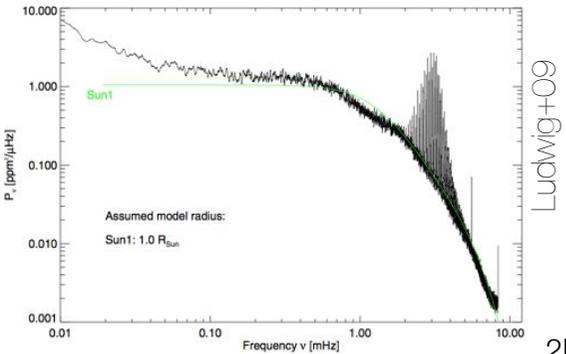
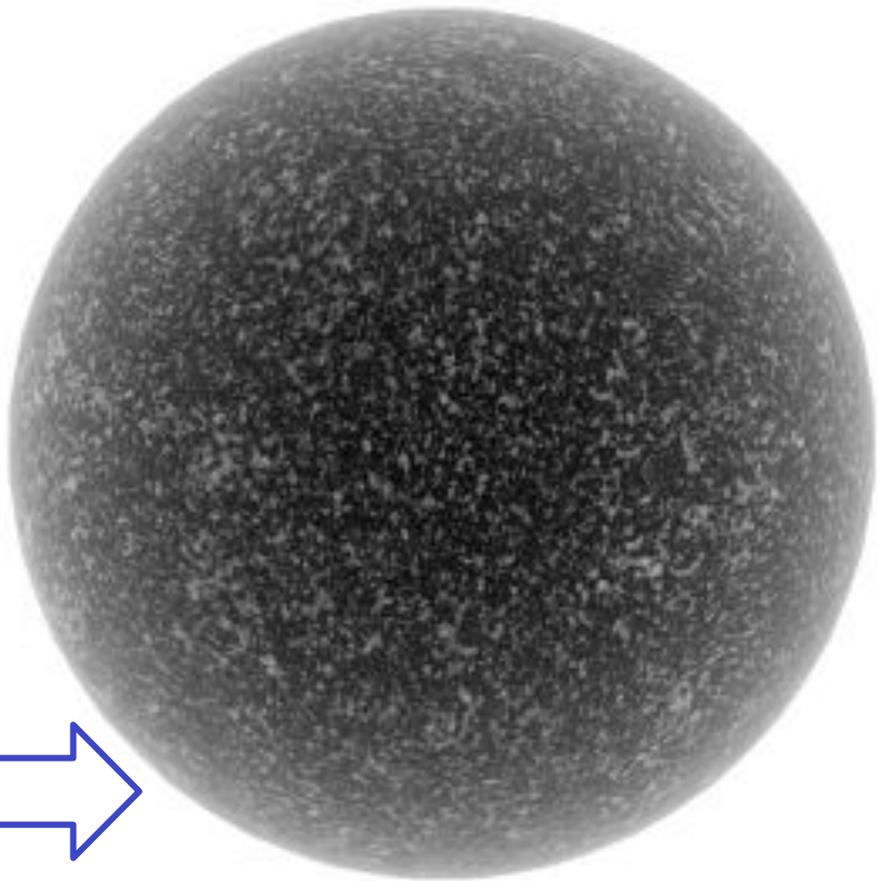
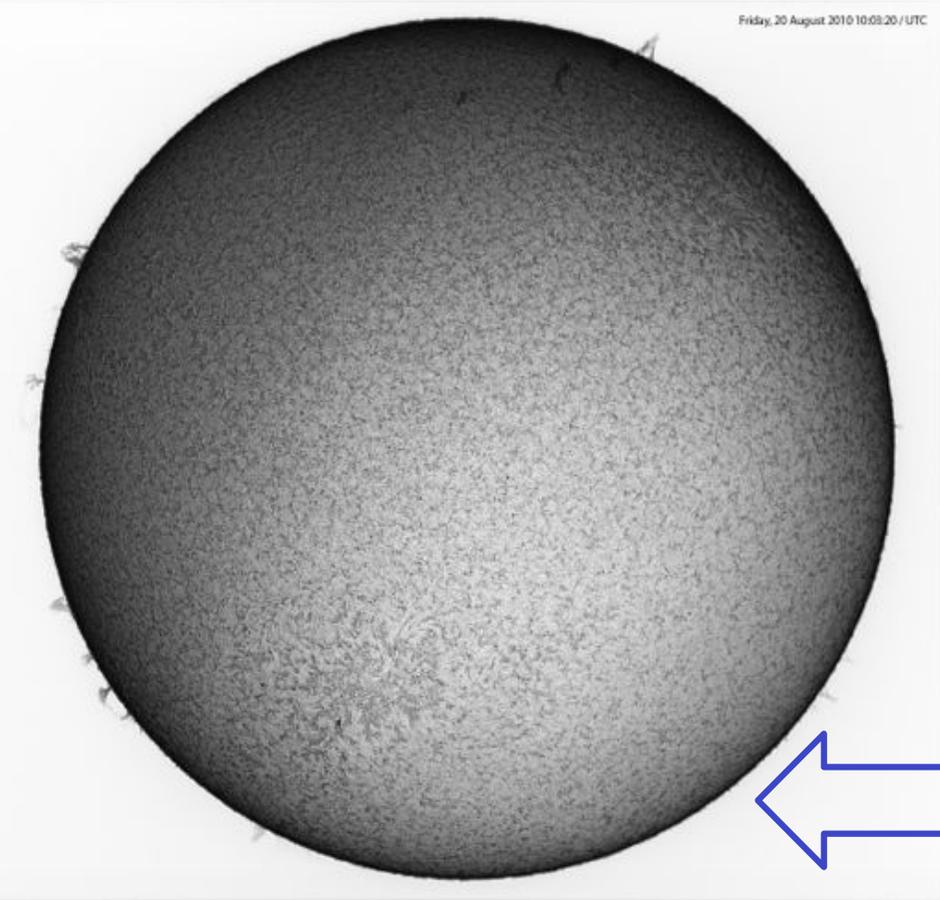
Hervé Dole, IAS - Univers et Cosmologie - 27 Août 2014 - E2PHY Clermont-Ferrand



notre ambition scientifique

comprendre la **structure**, l'**évolution** et les **lois physiques fondamentales** régissant l'**univers** et ses **constituants**.

un exemple



Hervé Dole, IAS

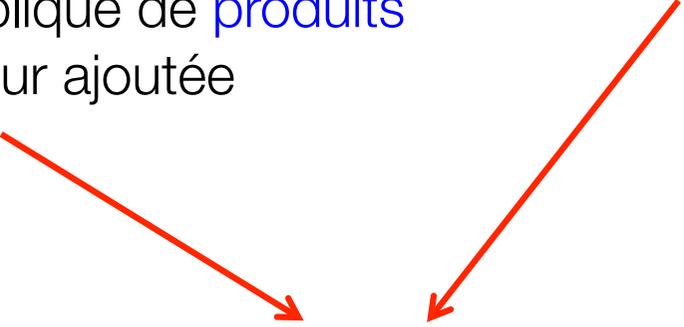
2PHY Clermont-Ferrand

Fig. 2. Power spectra of disk-integrated photometric fluctuations for the Sun: the predicted background signal of model Sun1 (green/grey solid line) and observational data from SOHO/VIRGO (black solid line)

notre ambition scientifique

comprendre la **structure**, l'**évolution** et les **lois physiques fondamentales** régissant l'**univers** et **ses constituants**.

- conception, développement, réalisation, tests, étalonnage d'**instruments**
- analyse et interprétation des **données**
- archivage, diffusion publique de **produits scientifiques** à haute valeur ajoutée
- concepts **théoriques**
- développement de **modèles**, simulations



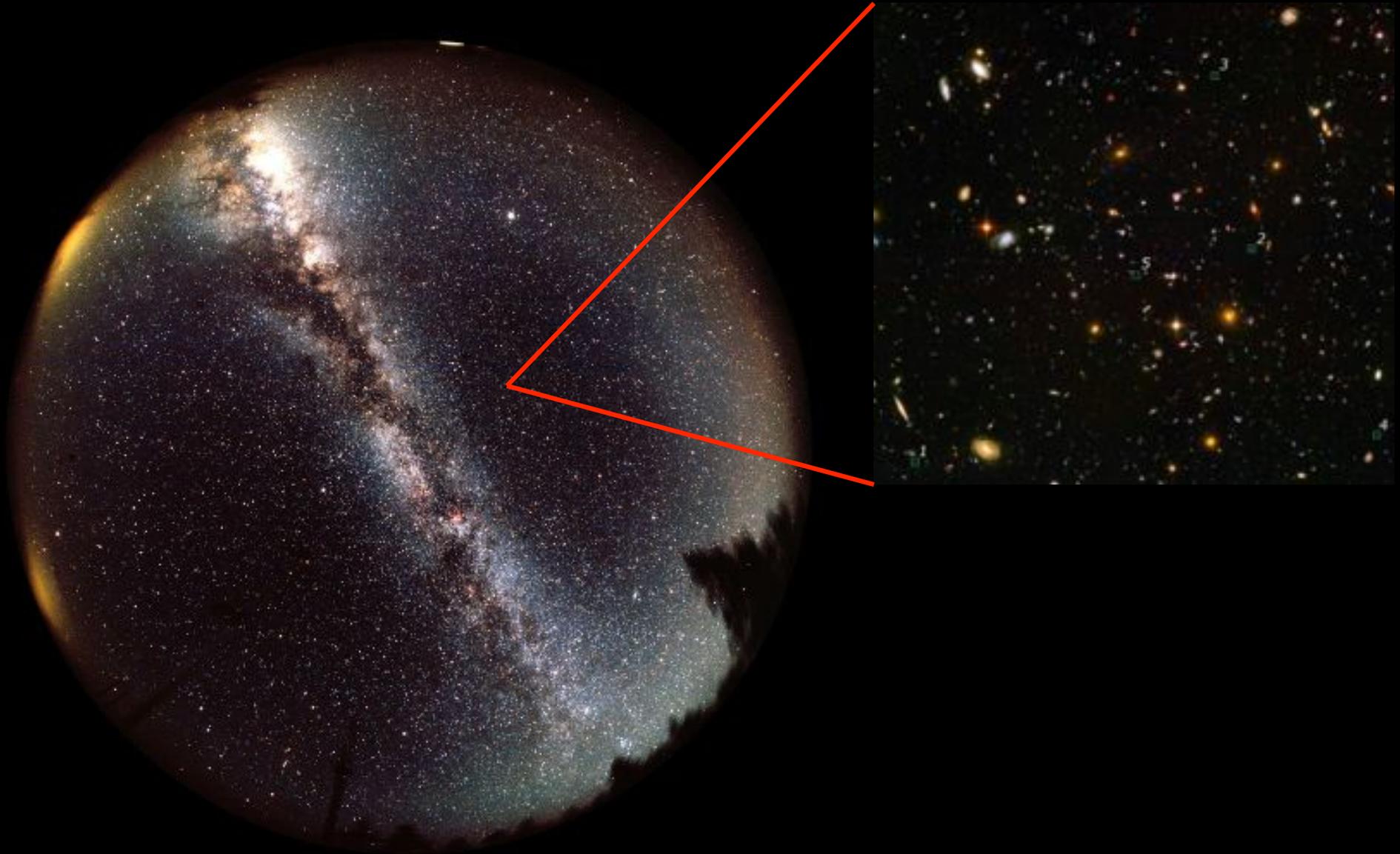
▪ confrontation **théorie+modèles** vs **données**

plan

1. pourquoi la nuit est-elle noire ?
2. à quoi ressemble le ciel ?
3. l'astrophysique est elle une science ?
4. le fond diffus cosmologique (CMB) et les piliers du modèle standard du Big Bang
5. petite histoire de l'Univers
6. les deux grandes questions
7. principaux résultats du satellite Planck
 - dont: comment mesure t-on (l'âge de) l'Univers ?
8. résumé
9. remarques finales

1. pourquoi la nuit est-elle noire ?

pourquoi la nuit est-elle noire ?



left: D. Officer, P. Welch, UofA
right: NASA, HST

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...

[Ici: incompatibilité entre observation et modèle !](#)

pourquoi la nuit est-elle noire ?

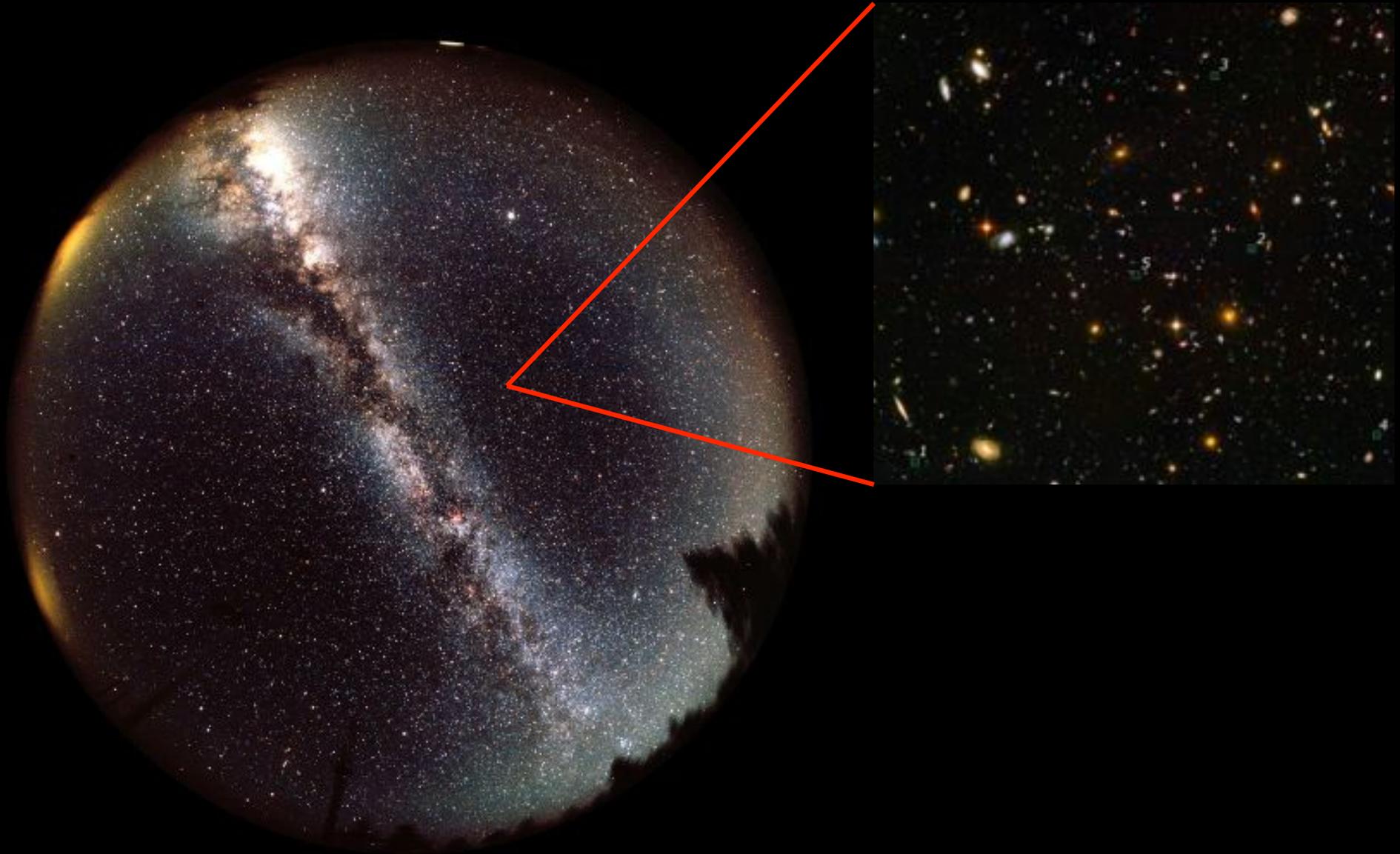
- Digges (16^è), **Chéseaux** (17^è), Halley (18^è), **Olbers** (19^è)
- Herschel, Kant, Proctor, Fournier d'Albe, Charlier
- **Poe** (19^è), **Kelvin** (19^è)
- Wesson (1987, 1991)

- 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

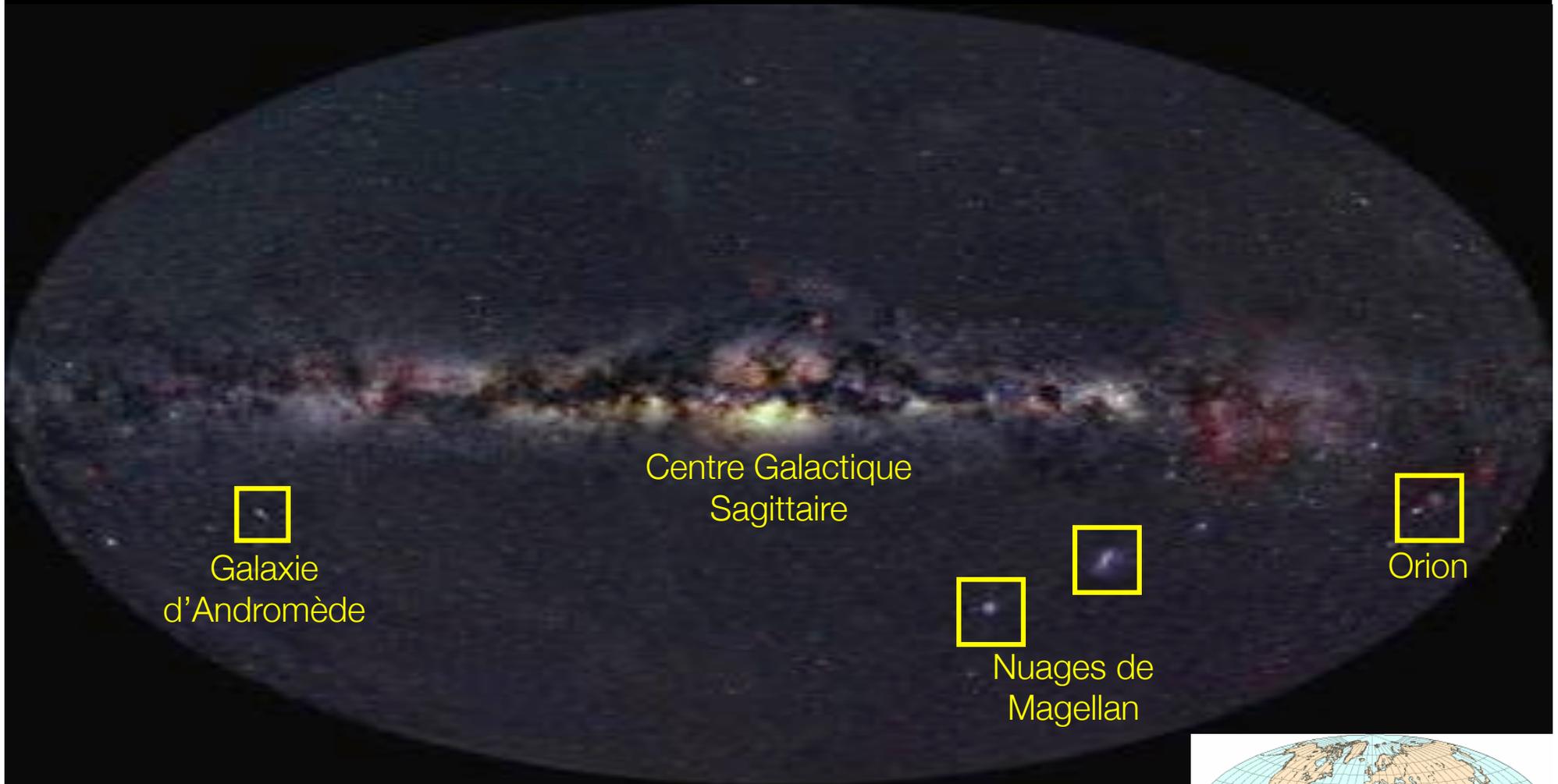
2. à quoi ressemble le ciel ?

pourquoi la nuit est-elle noire ?



left: D. Officer, P. Welch, UofA
right: NASA, HST

le ciel: visible

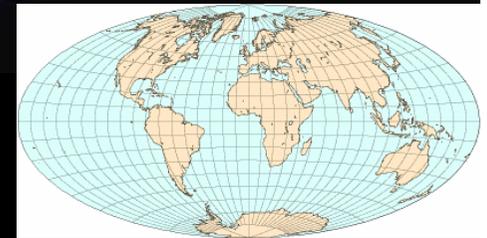


Galaxie
d'Andromède

Centre Galactique
Sagittaire

Nuages de
Magellan

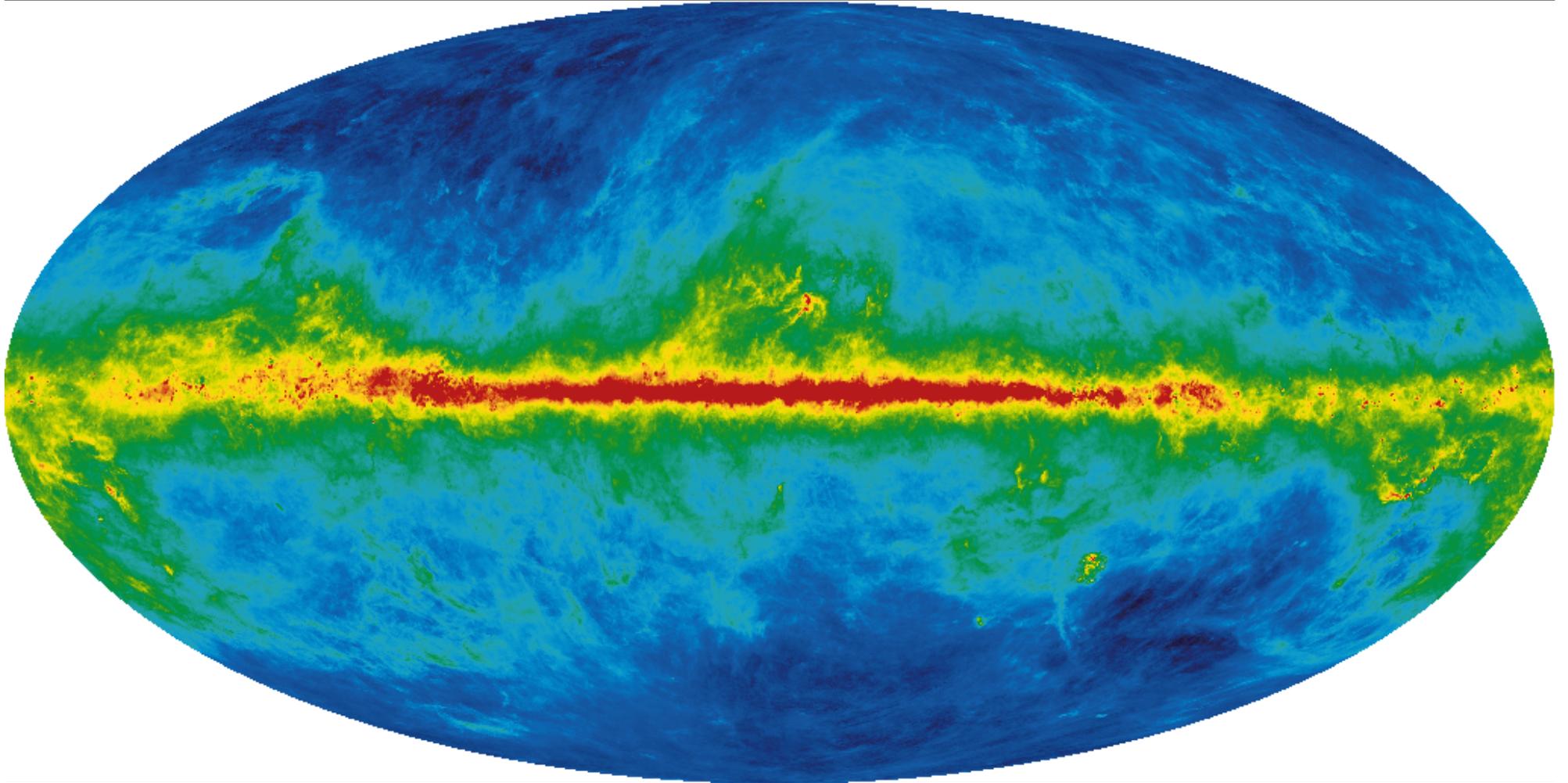
Orion



Axel Mellinger

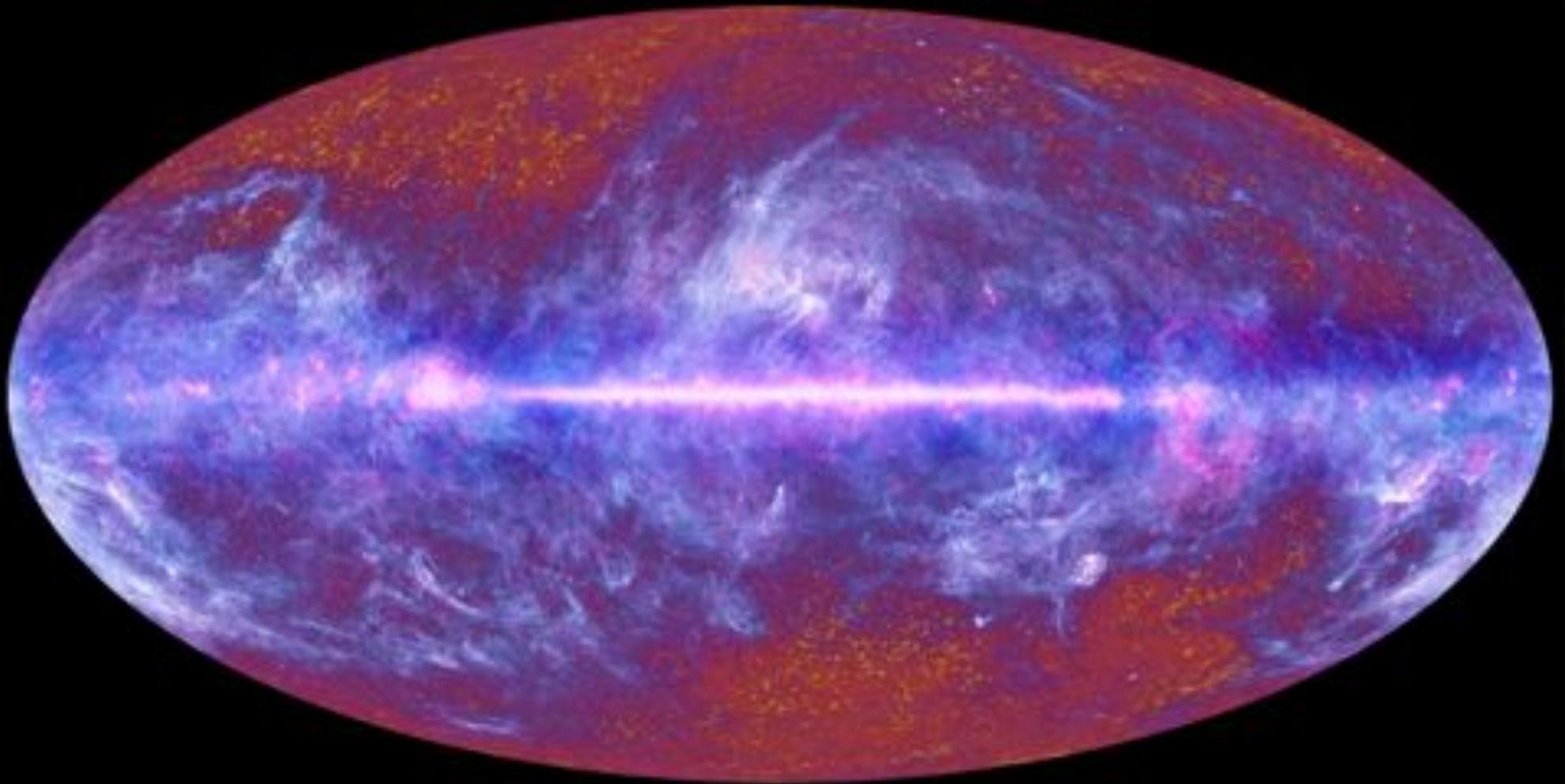
http://canopus.physik.uni-potsdam.de/~axm/mwpan/mwpan_web.html

le ciel: infrarouge lointain



IRAS 100um IRIS

le ciel: ondes millimétriques (ou micro-ondes)

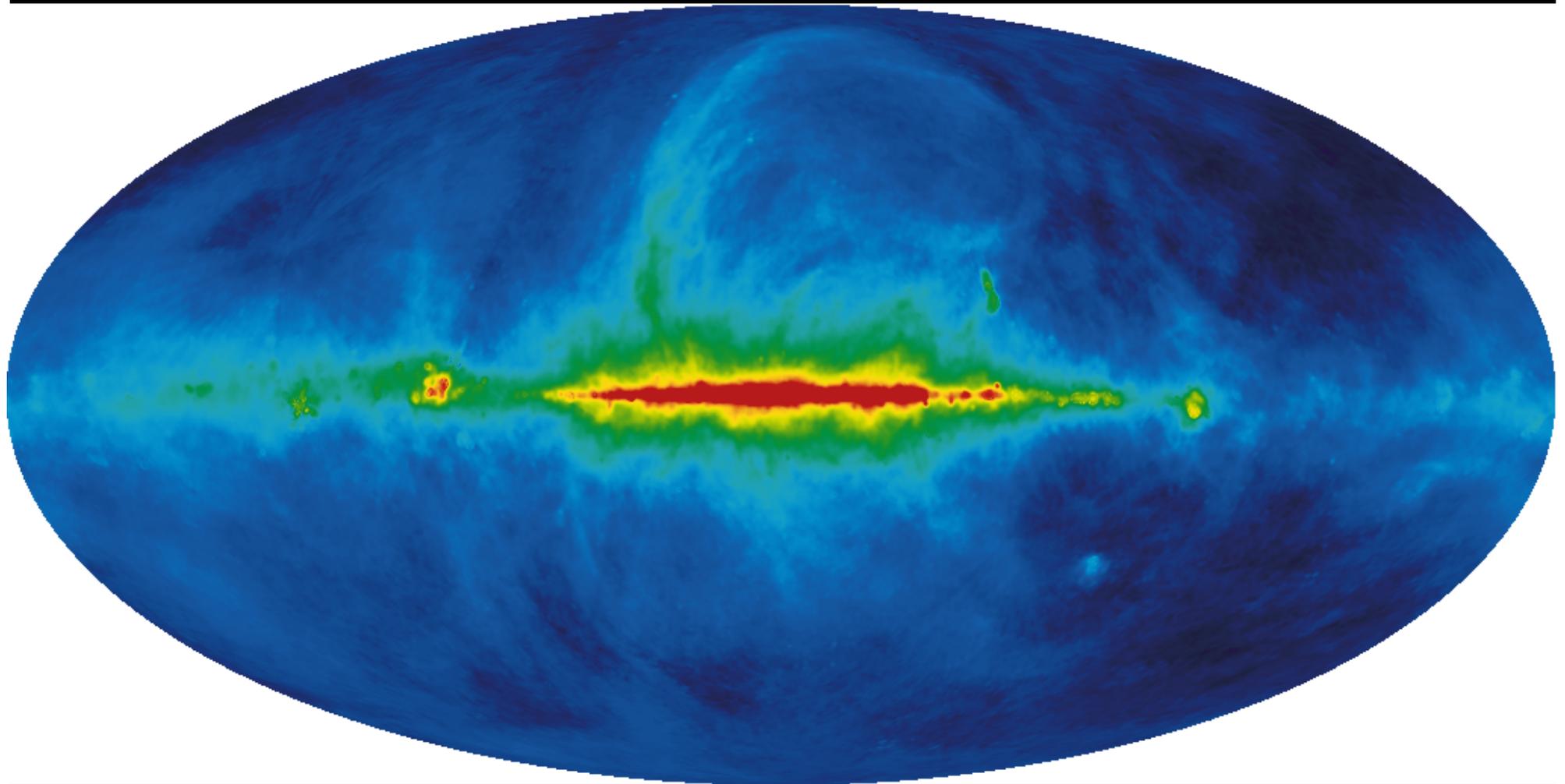


The PLANCK one-year all-sky survey



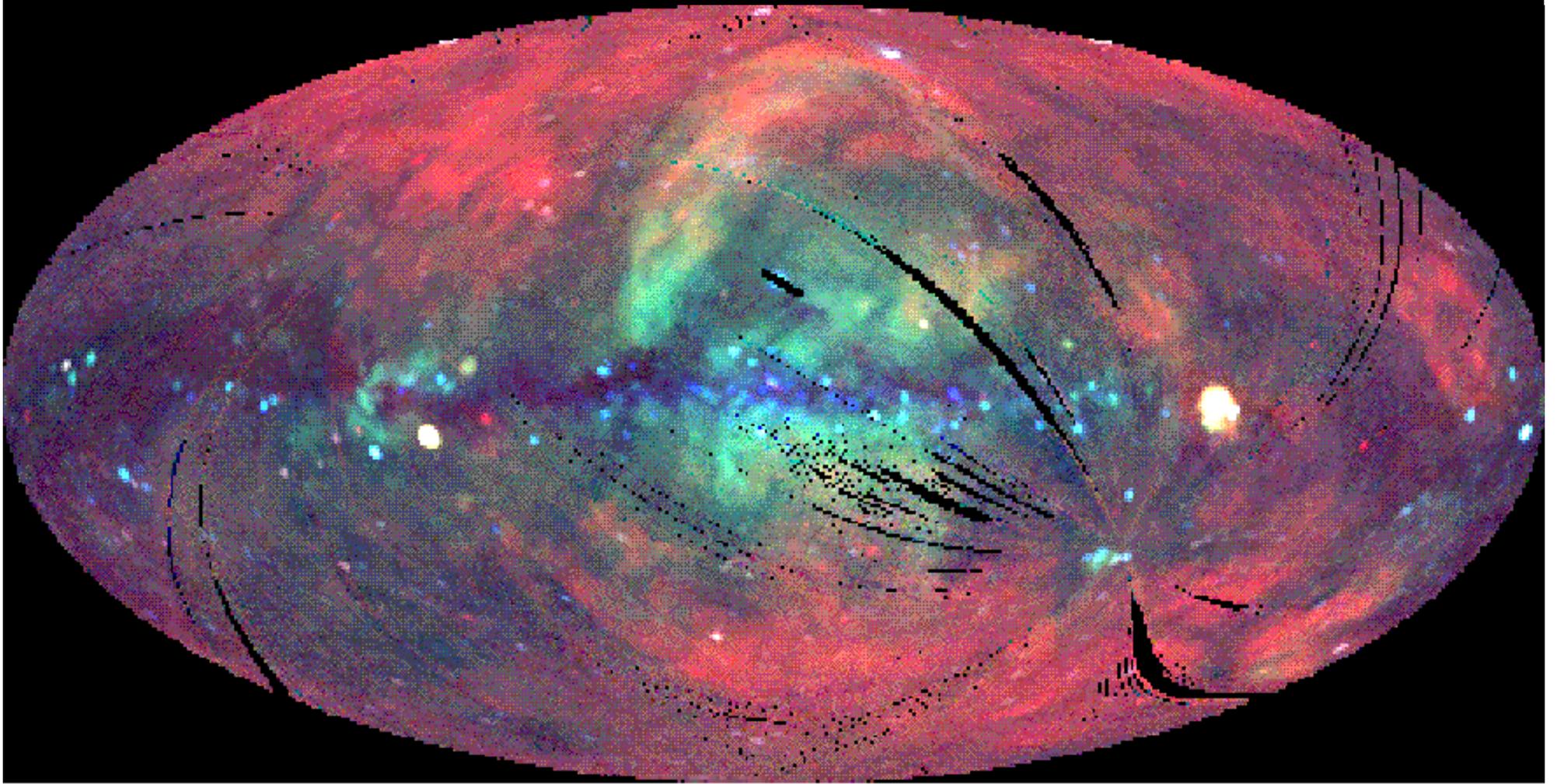
[c] ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

le ciel: radio



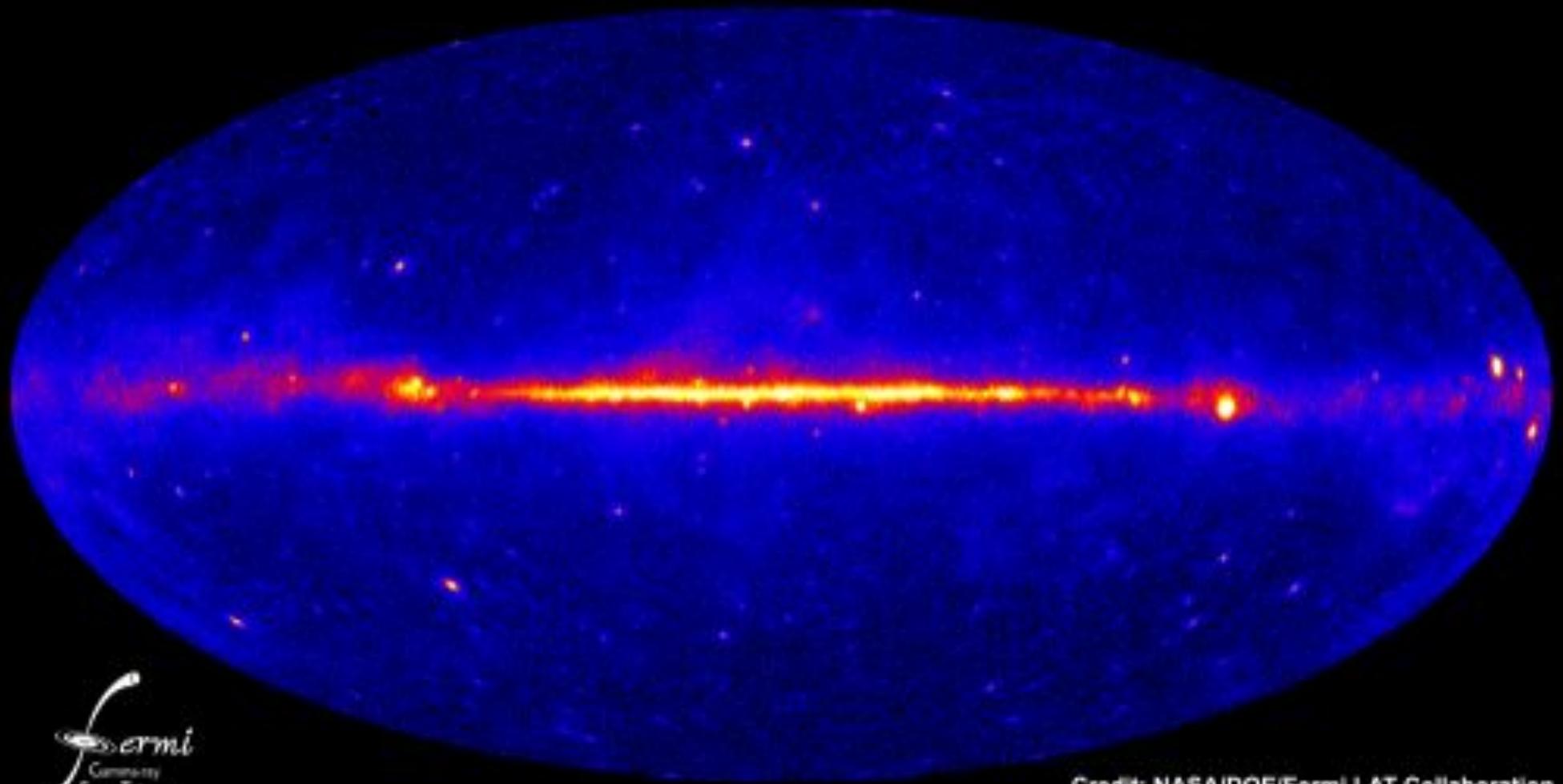
21 cm Leiden/Parkes

le ciel: rayons-X



ROSAT

le ciel: rayons gamma

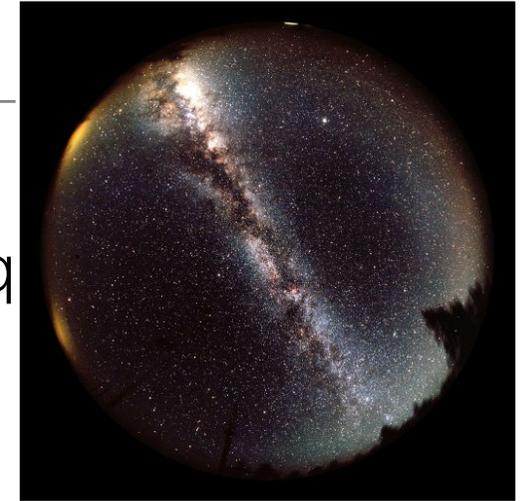


Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

FERMI LAT

la nuit ...

- est **noire** dans le domaine visible
- apparait différente: infrarouge, submillimétrique, 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** ?
- sur les **lois physiques fondamentales** ?
- l'univers est bien un **laboratoire**



3. l'astrophysique est elle une science ?

3. l'astrophysique est-elle une science ?

moyennant:

- principe d'intelligibilité
- principe ergodique

4. le fond cosmologique et le modèle standard du Big Bang

Rayonnement radio en 1964



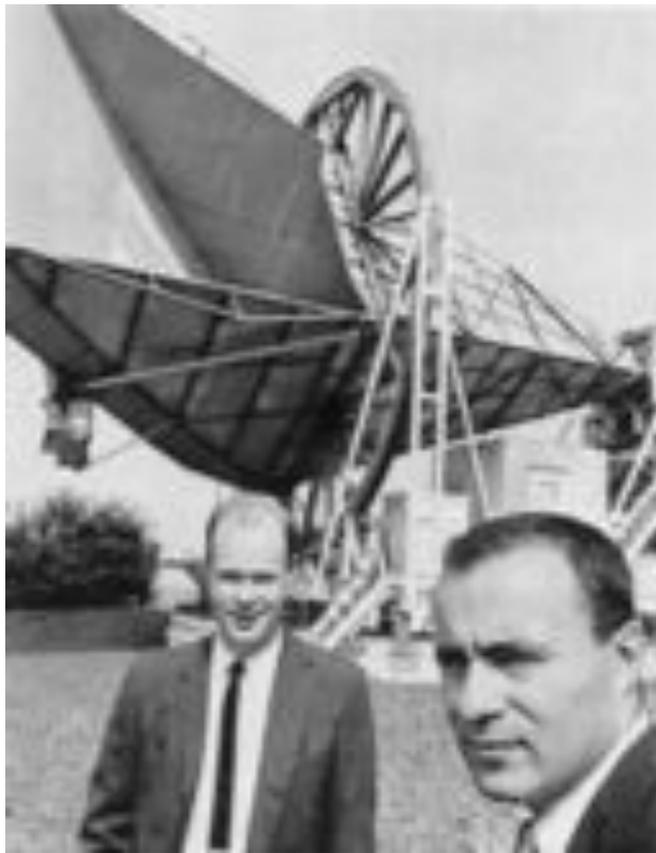
Bell Labs, New Jersey, 1964



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.

« voir » le CMB en plein jour à Paris

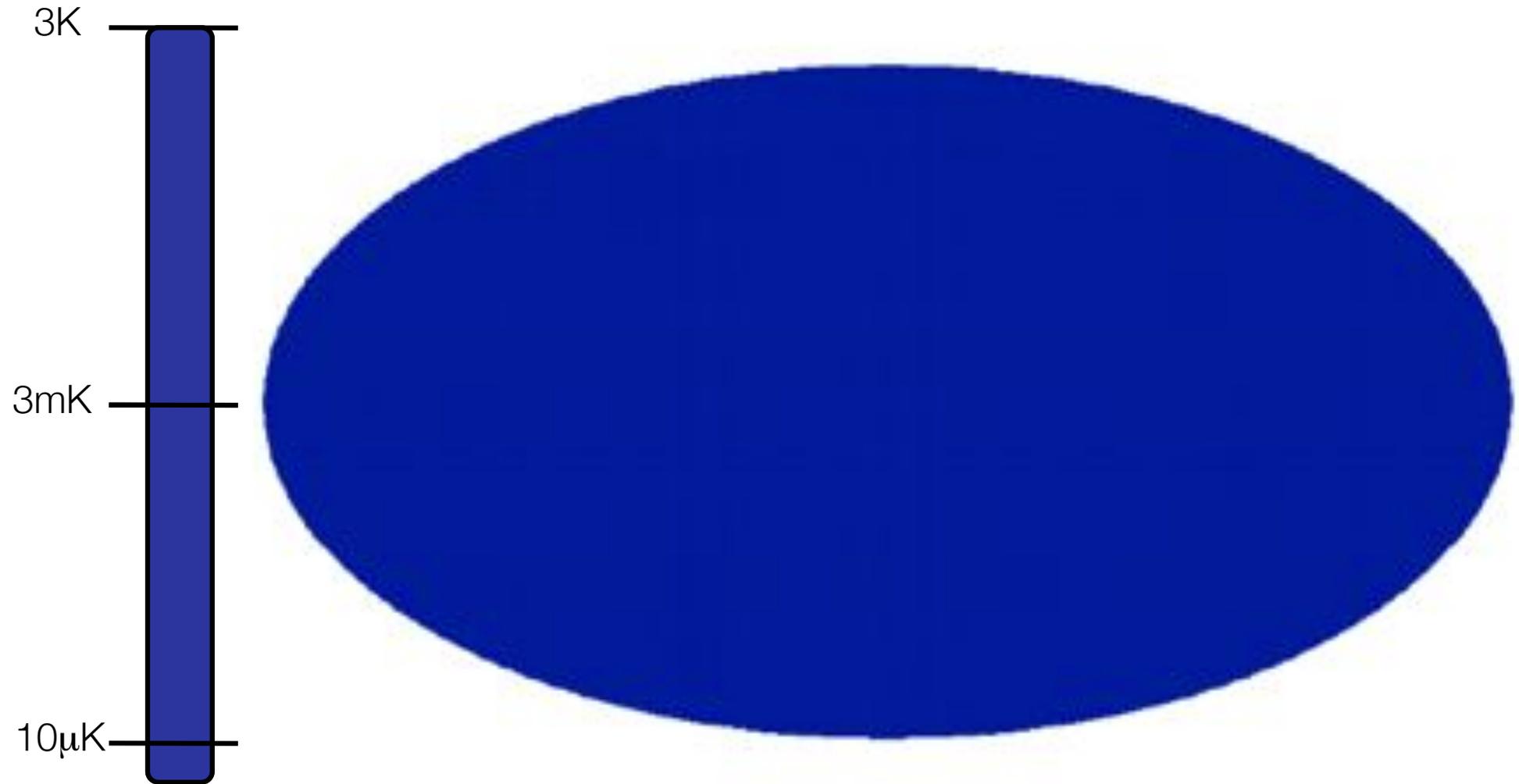


observations du **CMB (fond cosmologique)** à la Penzias & Wilson au laboratoire APC (Paris Diderot) avec Michel Piat, à 10 GHz ($\sim 3\text{cm}$) avec les étudiants du Master 2 Pro OSAE (collaboration avec IAS Orsay et université Paris Sud 11)

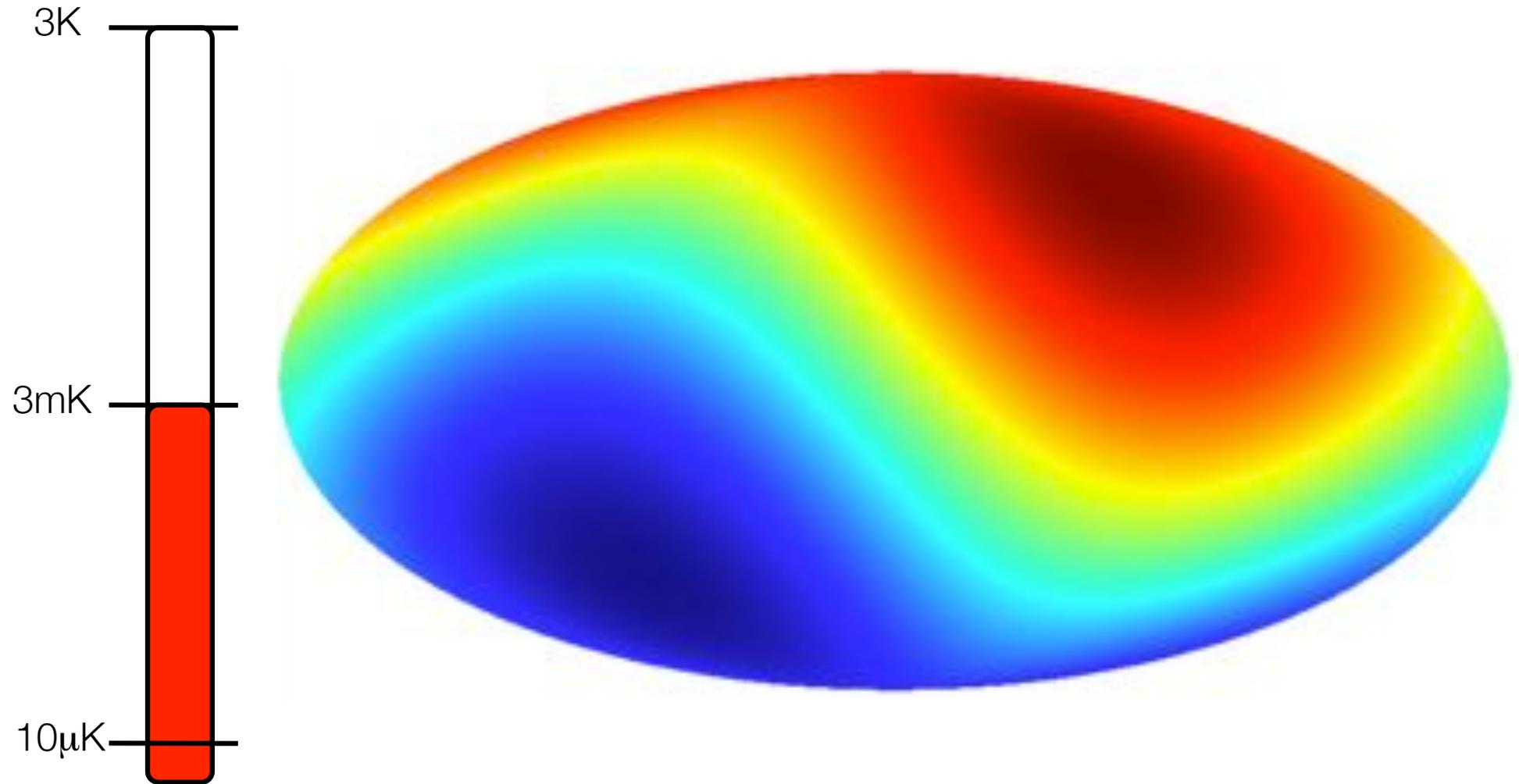
les émissions reliques (le CMB en tout cas) peuvent être intenses !

photos: H. Dole

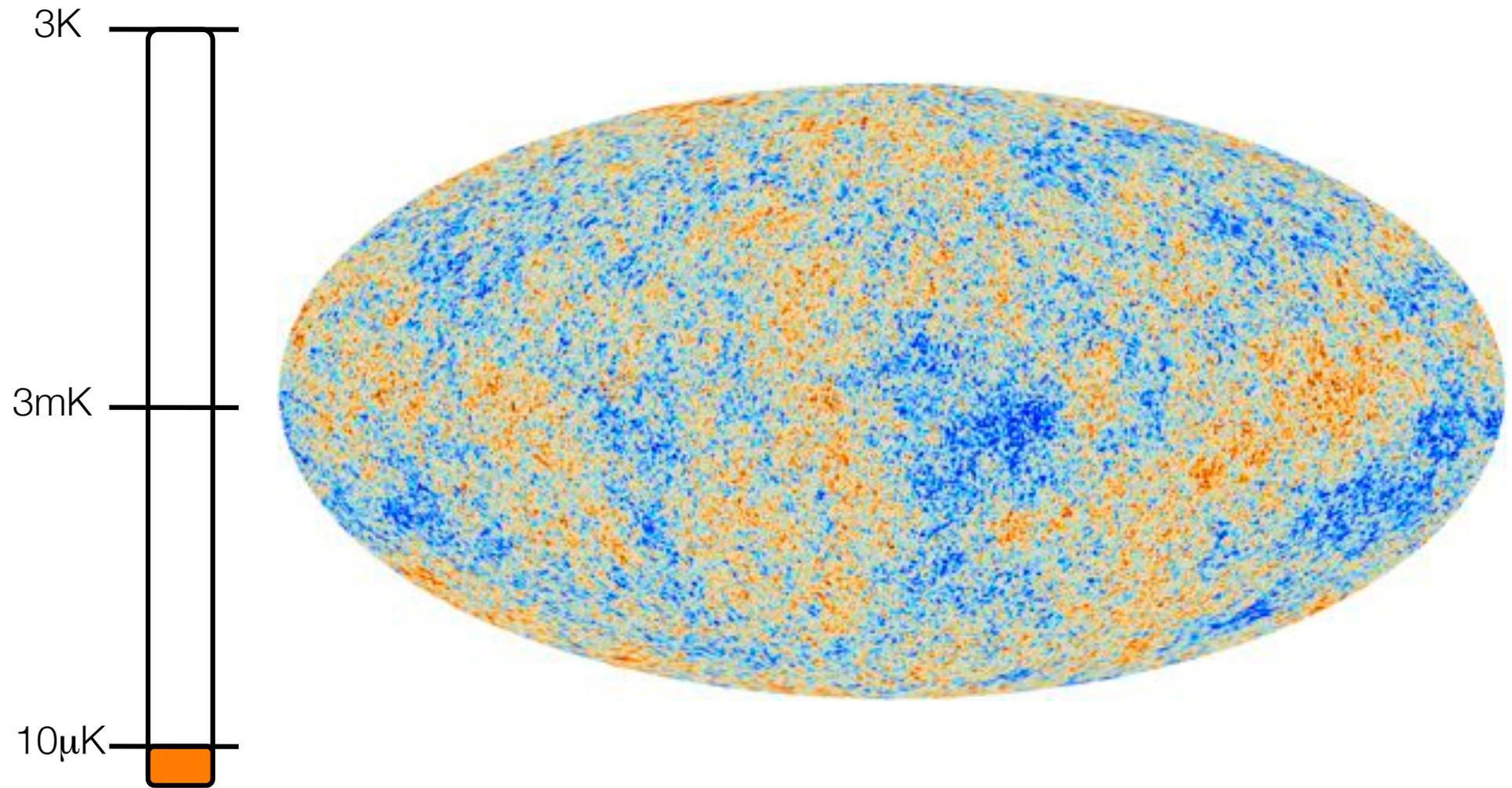
fond diffus cosmologique: monopôle



fond diffus cosmologique: dipôle

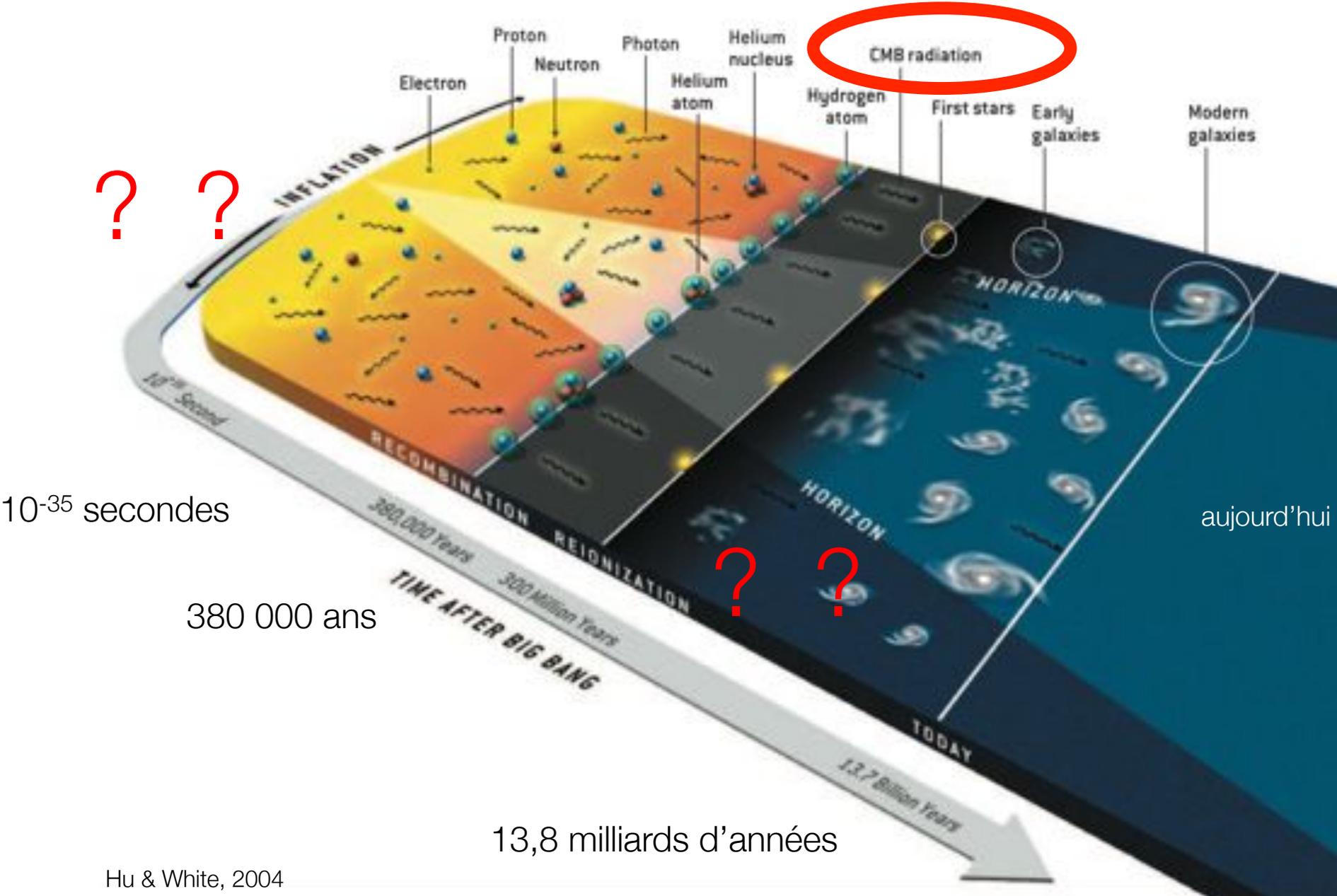


fond diffus cosmologique: fluctuations



Planck 2013

petite histoire de l'Univers



10⁻³⁵ secondes

380 000 ans

13,8 milliards d'années

Hu & White, 2004

les piliers observationnels du Big Bang

- existence d'une radiation relique: le fond cosmologique
- récession des galaxies: expansion de l'Univers
- abondance des éléments légers (H, He, Li)

Il s'agit d'un **modèle** rendant compte avec **précision** les **observations**, et proposant des **prédictions** qui s'avèrent être **observées**. Ce modèle est **dynamique**.

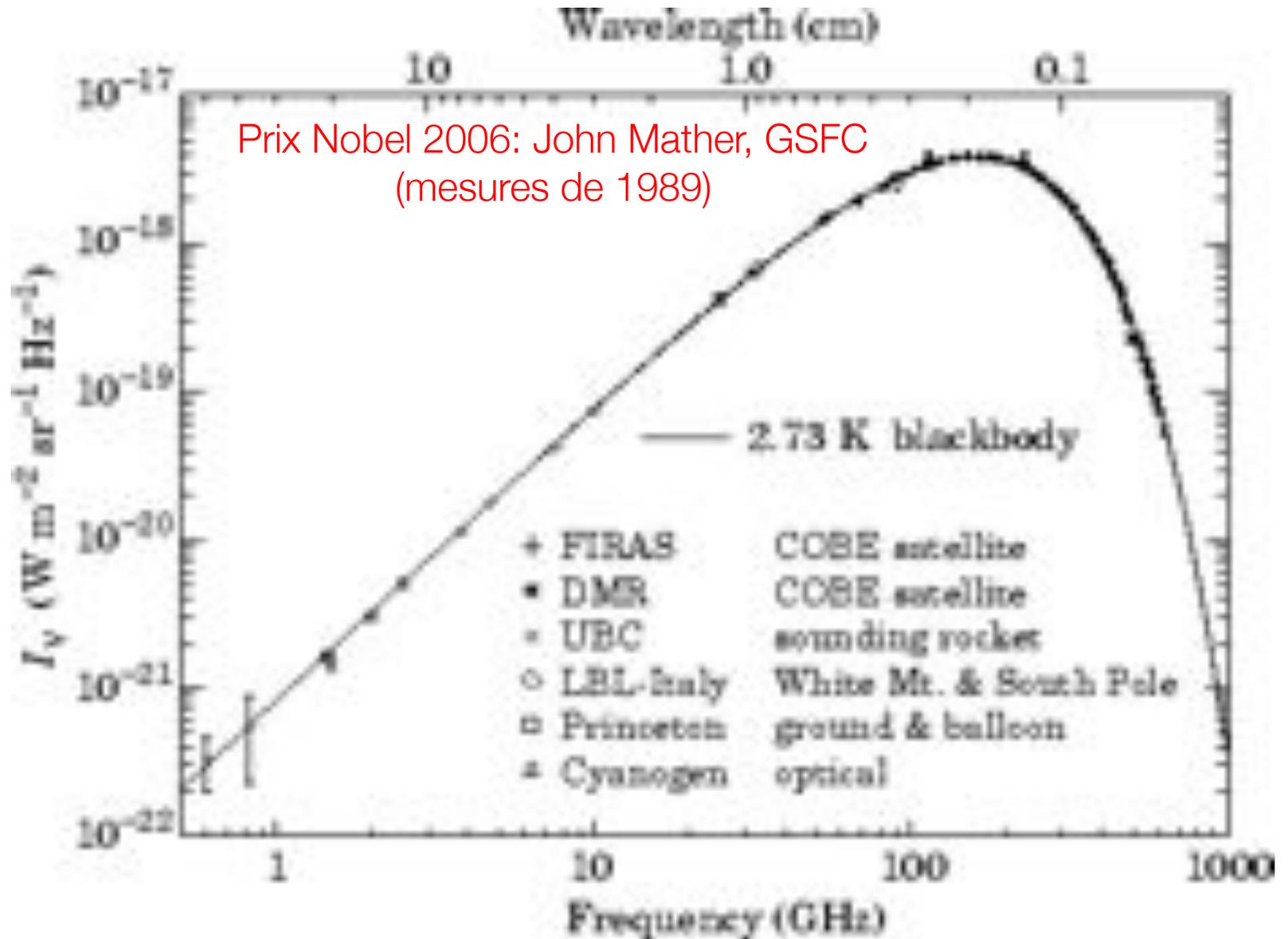
Exemples de prédictions réussies:

- spectre de corps noir du CMB
- fluctuations du CMB
- BAO (distribution angulaire des galaxies)

propriétés du fond diffus cosmologique

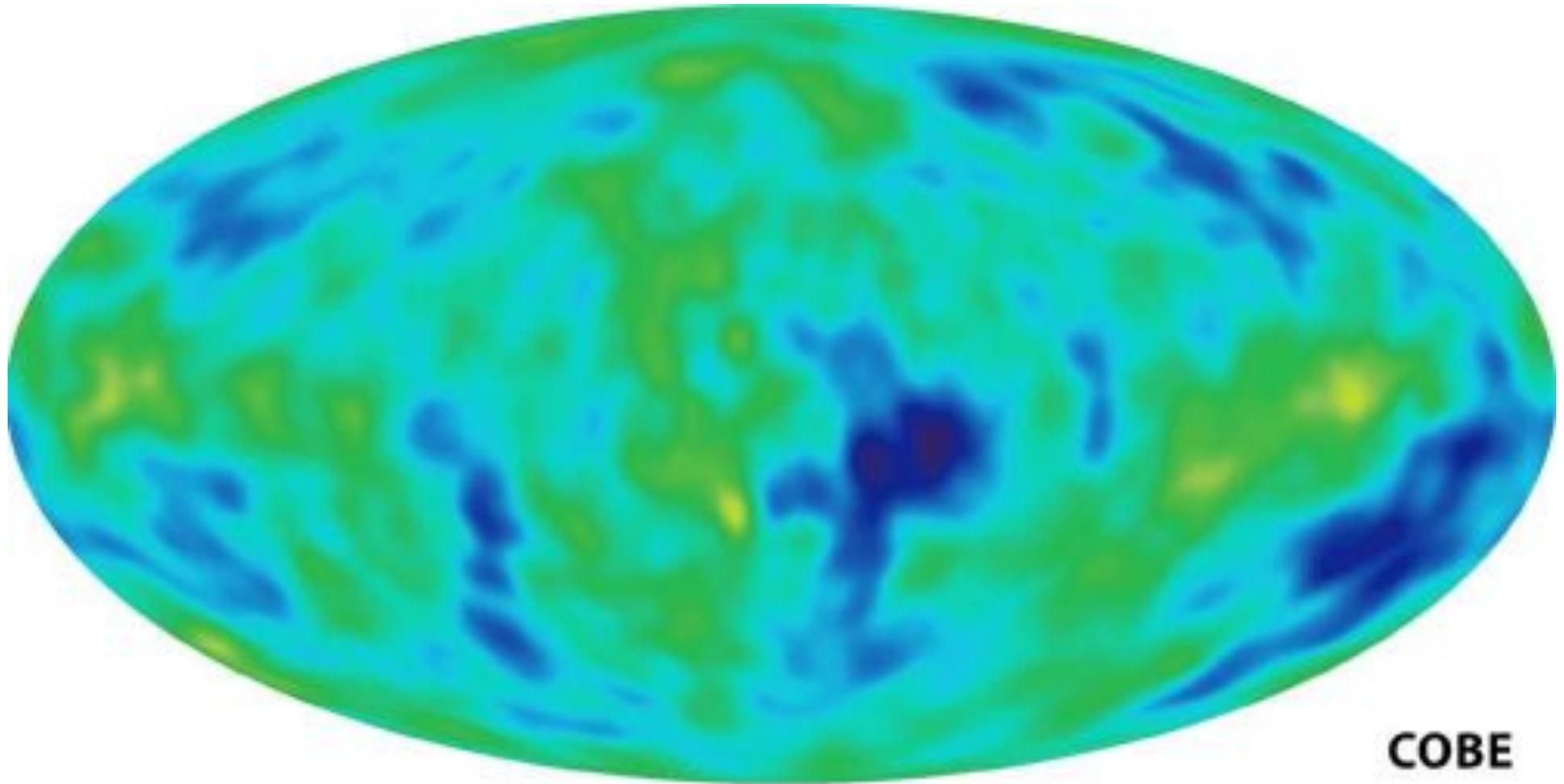
rayonnement
de corps noir
 $T=2.725\text{ K}$

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



fluctuations de température

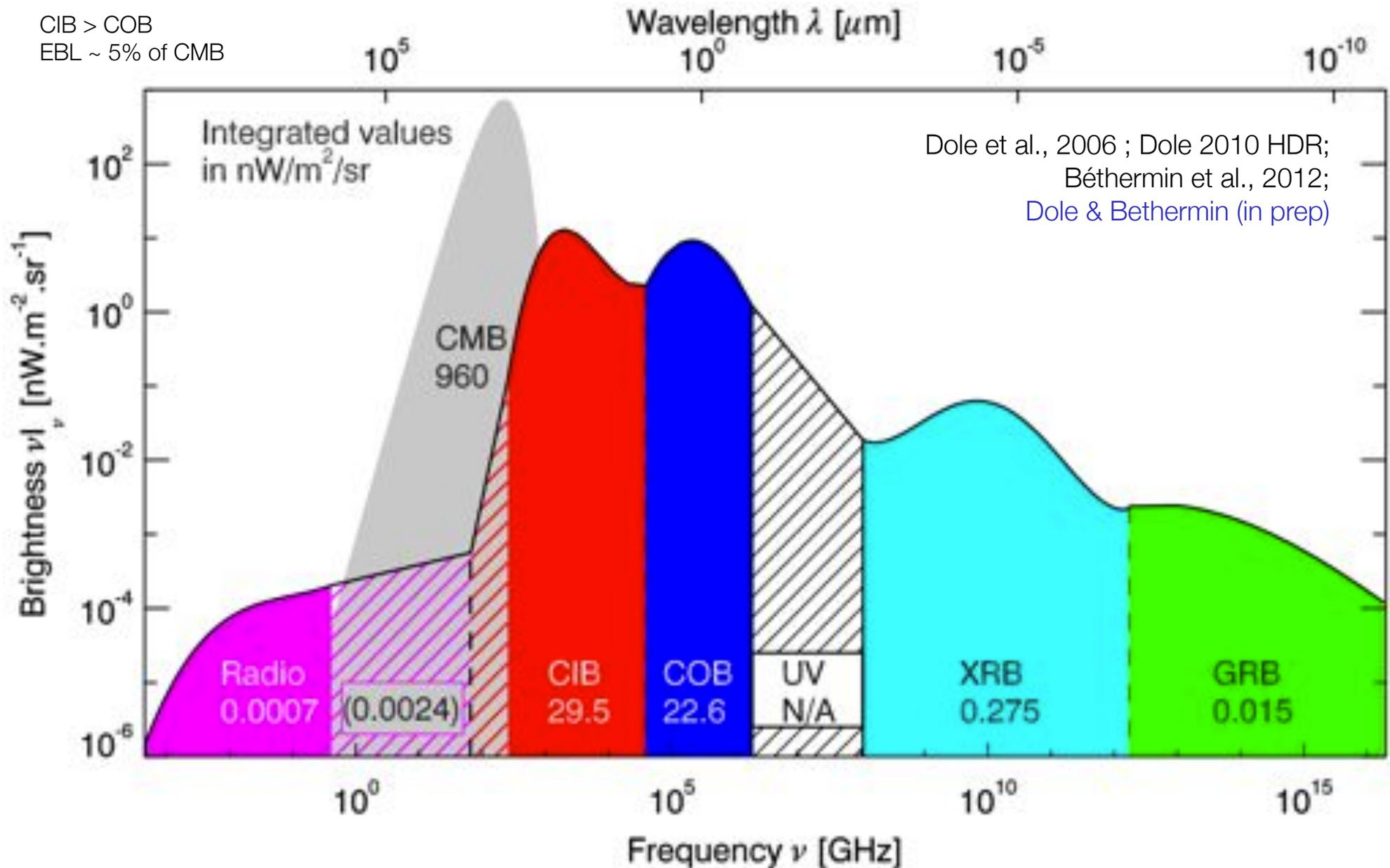
l'amplitude des fluctuations est de l'ordre de la dizaine de microKelvin !



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

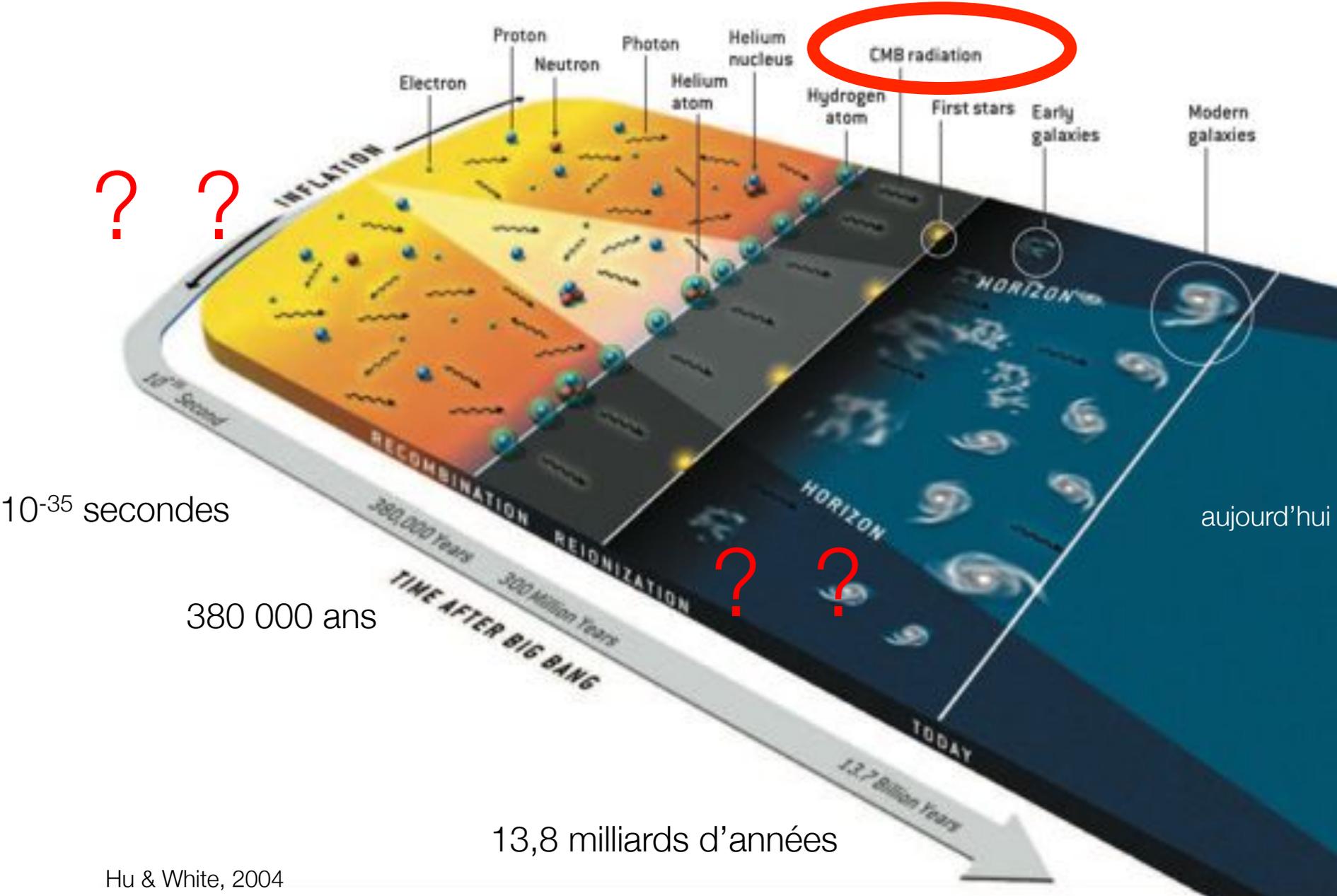
le spectre de l'Univers : nuit pas noire !

CIB > COB
EBL ~ 5% of CMB



5. petite histoire de l'Univers

petite histoire de l'Univers



Hu & White, 2004

petite histoire de l'Univers

3 minutes pour former les atomes

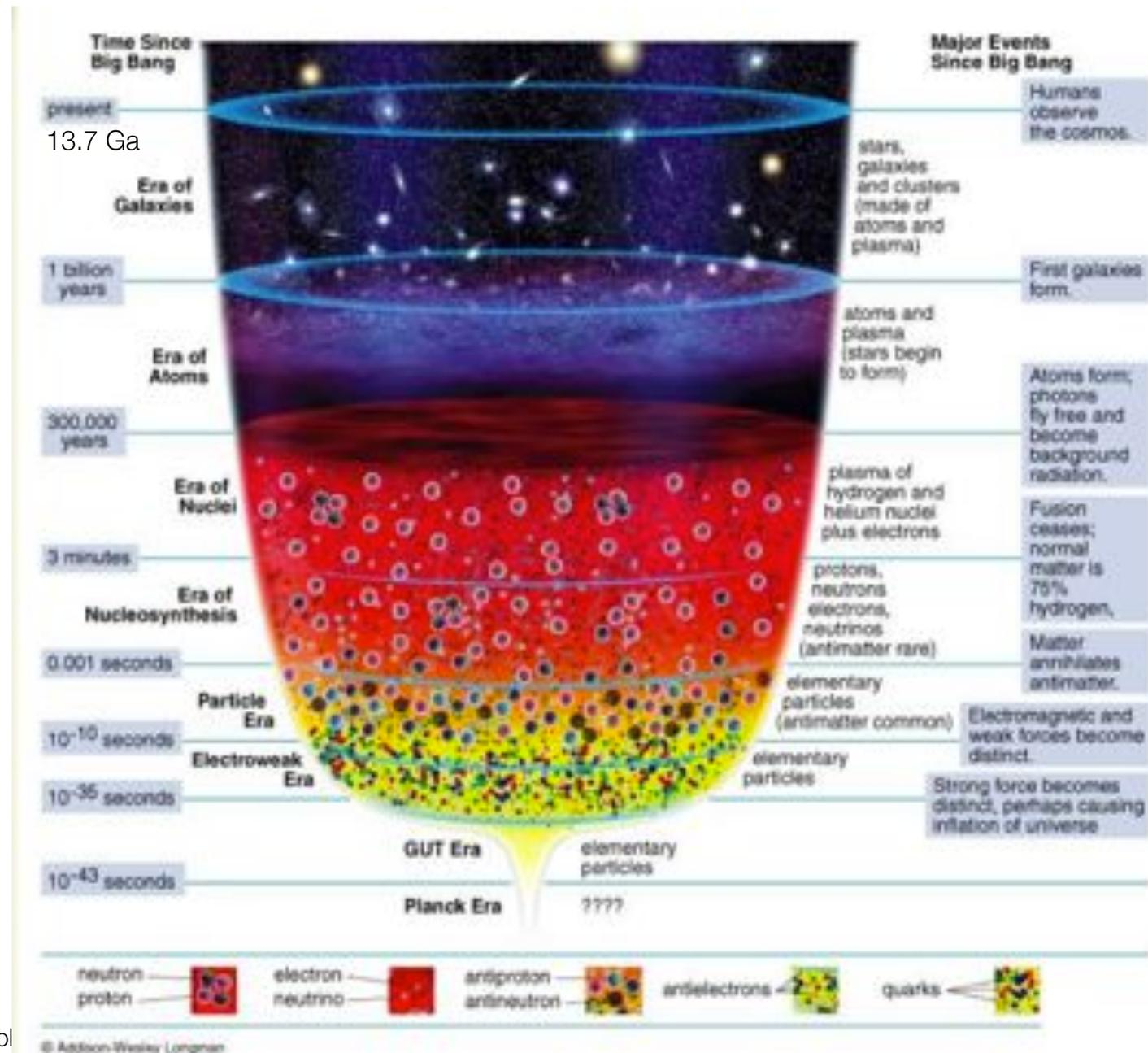
300 000 ans: l'Univers devient transparent

300 millions d'années pour former les premières étoiles

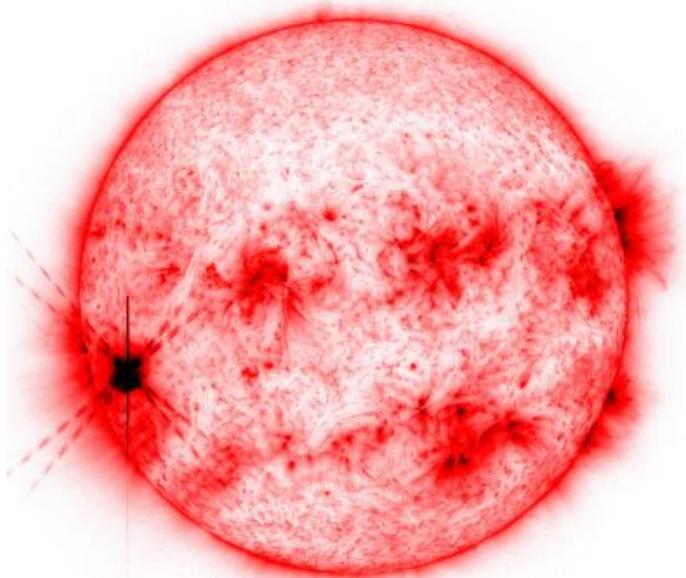
3 milliards d'années pour former la plupart des galaxies et étoiles

10 milliards d'années: notre Système Solaire se forme

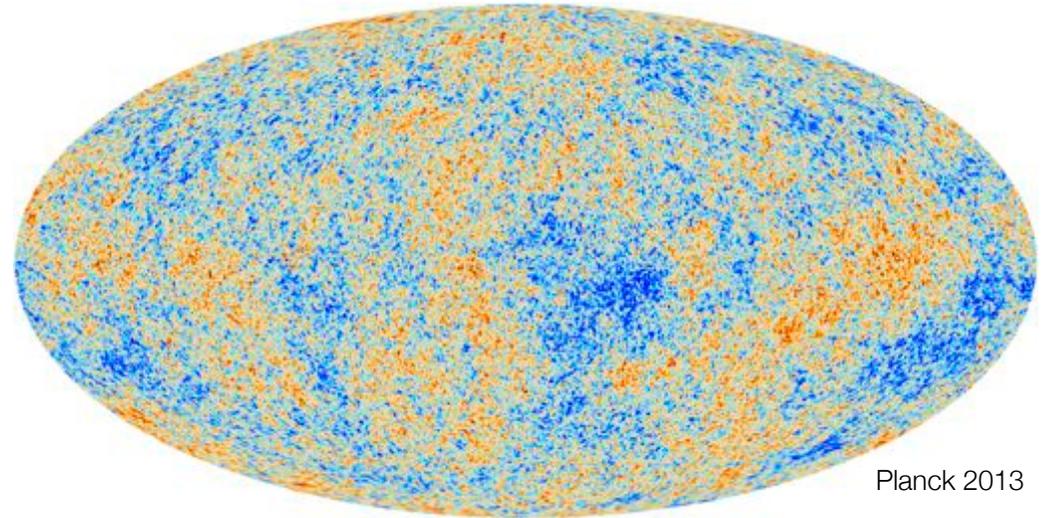
13.8 milliards d'années: aujourd'hui



une seule physique – multitude de conditions



SDO/AIA 131 2012-10-23 03:16:46 UT



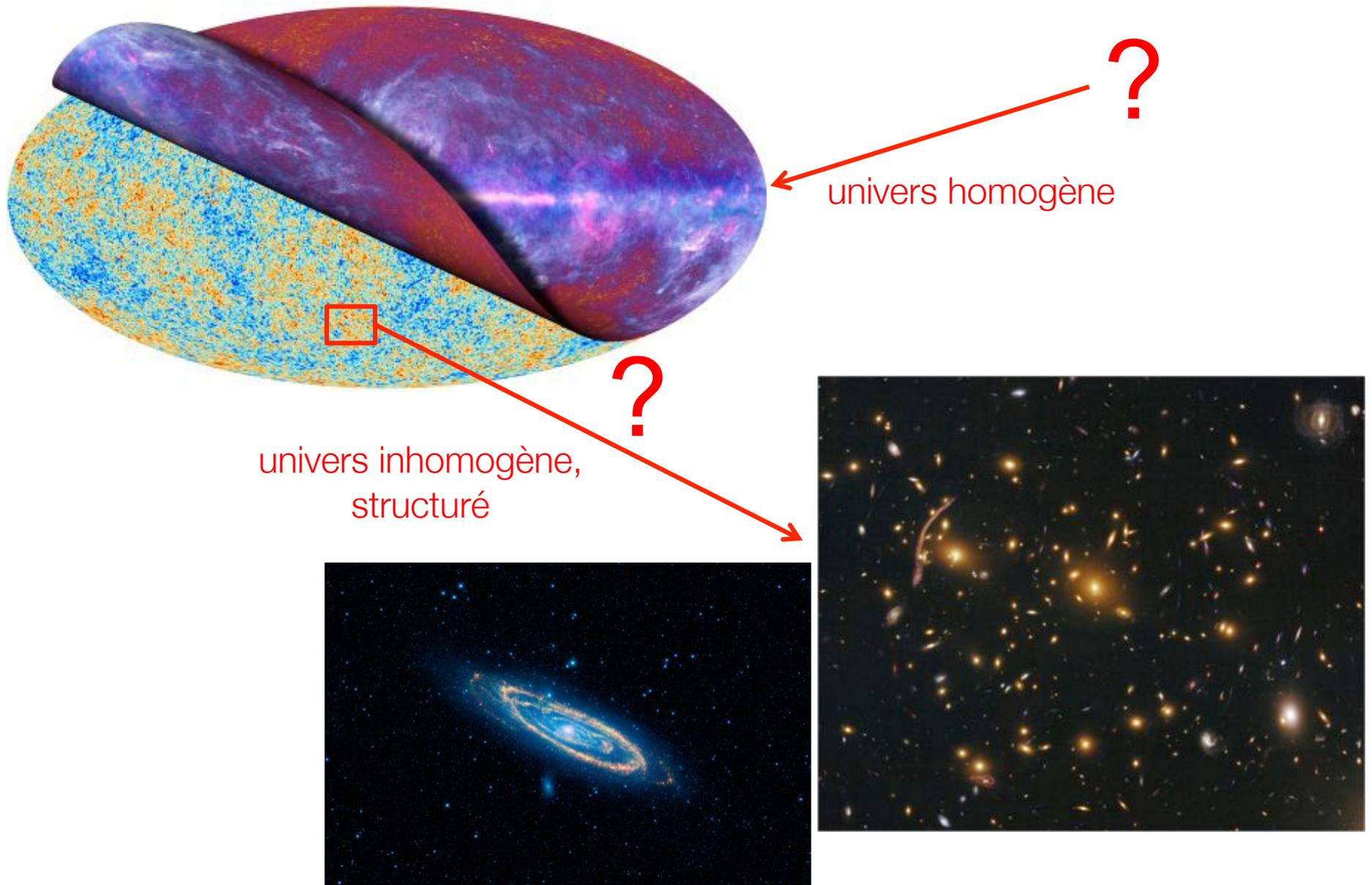
Planck 2013

parallèle saisissant et informatif avec les processus de physique stellaire (e.g. surface de dernière diffusion).

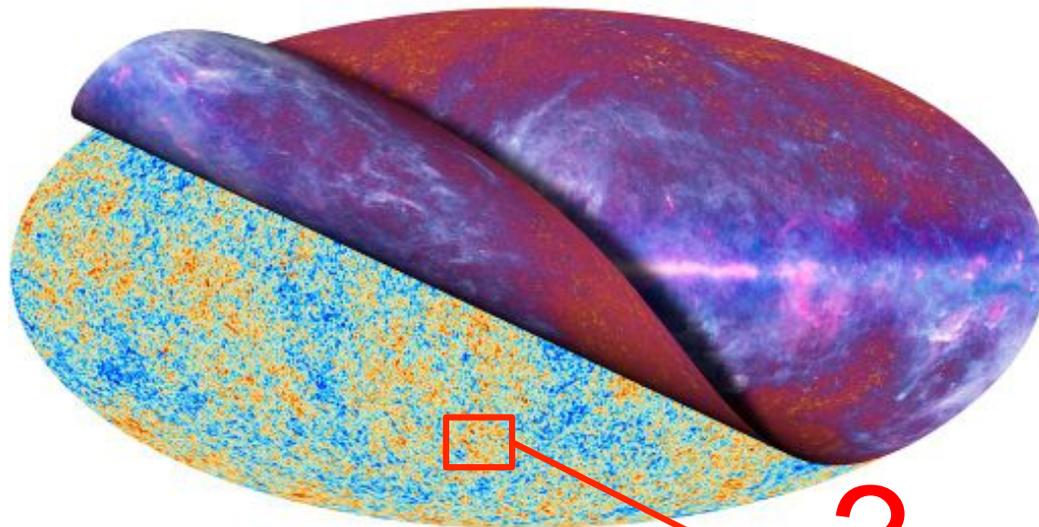
échelles spatiales et temporelles cependant très différentes.

6. les deux grandes questions en cosmologie

les deux grandes questions



les deux grandes questions



?
univers homogène
modèles d'inflation ?

?
univers inhomogène,
structuré

formation
des structures



7. principaux résultats du satellite Planck

7.1 Planck en bref

7.2 séparation des émissions du ciel

7.3 améliorations avec le temps et les technologies

7.4 comment mesure t-on notre Univers ?

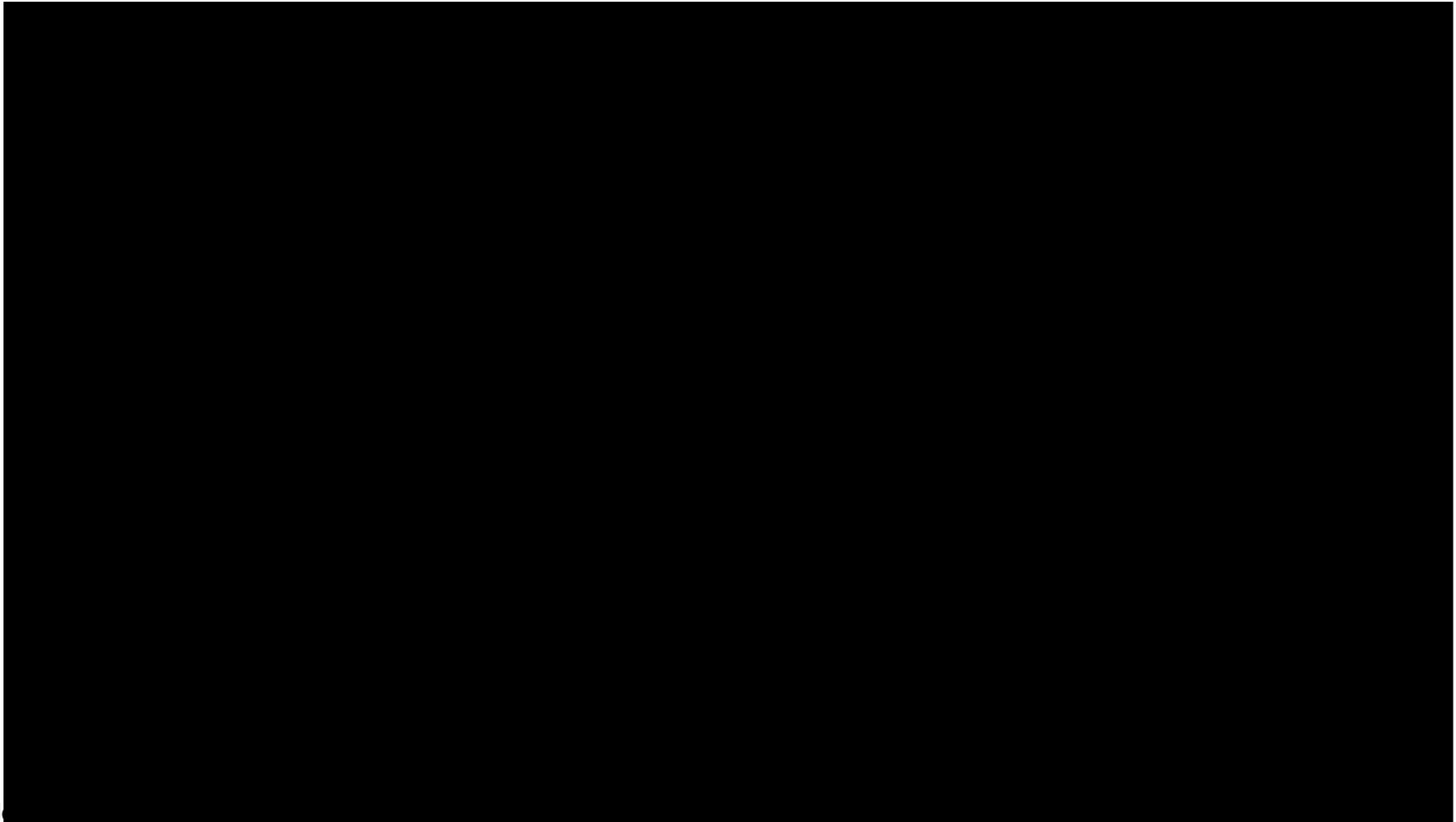
7.5 le modèle standard Λ CDM

7.6 l'inflation à portée de main

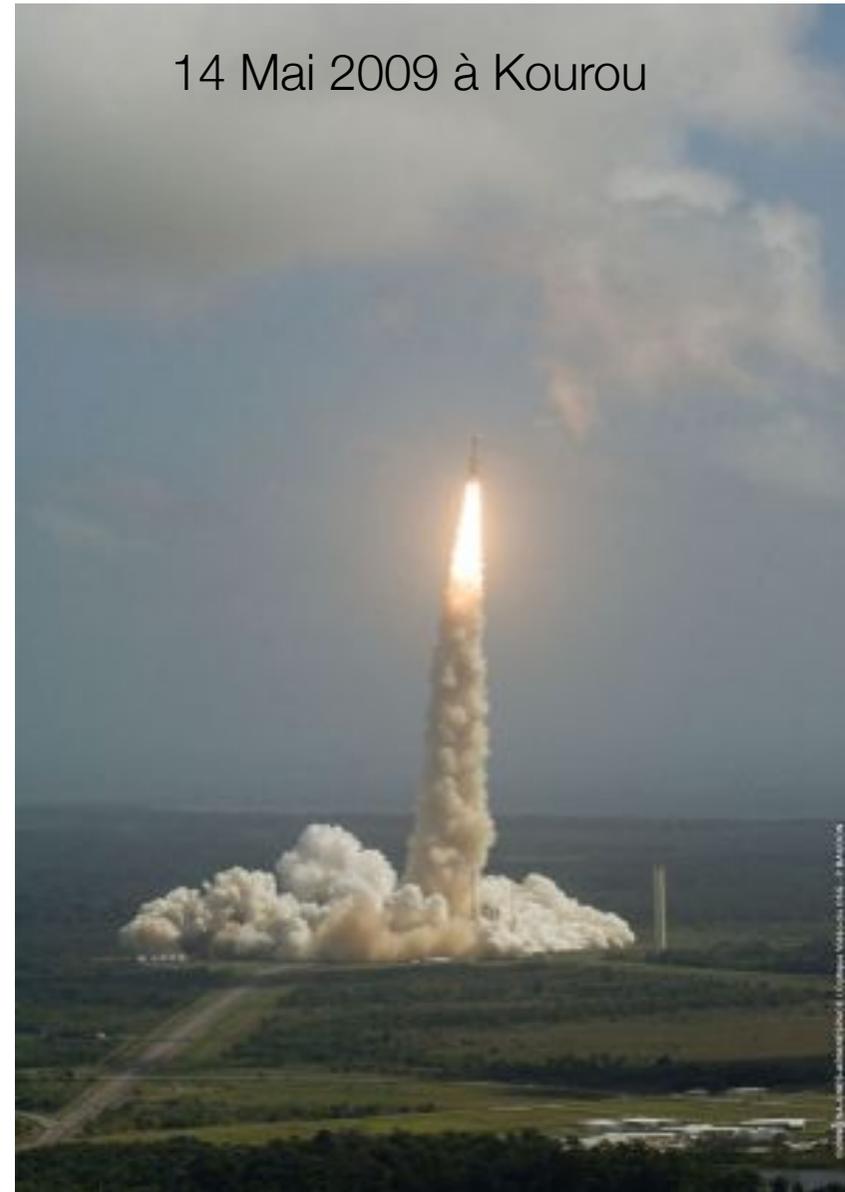
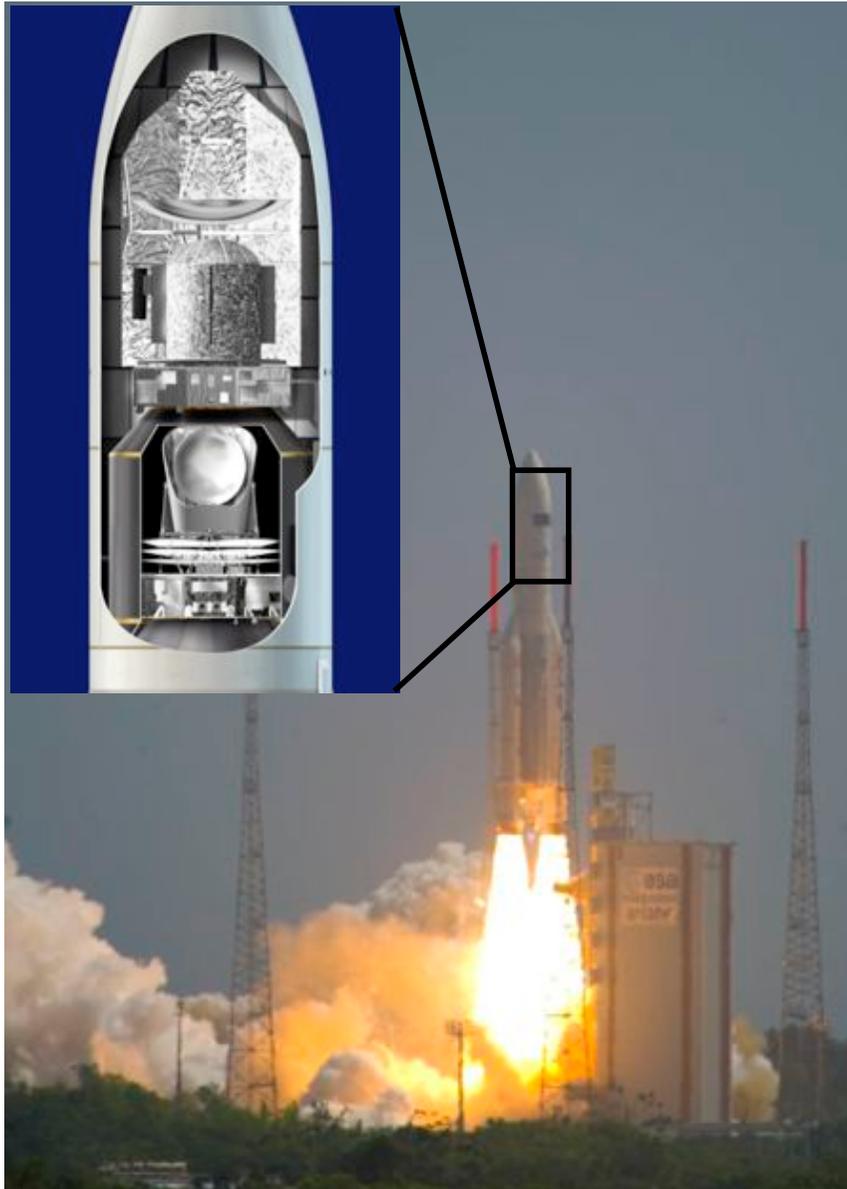
7.7 la matière noire se révèle

7.1 Planck en bref

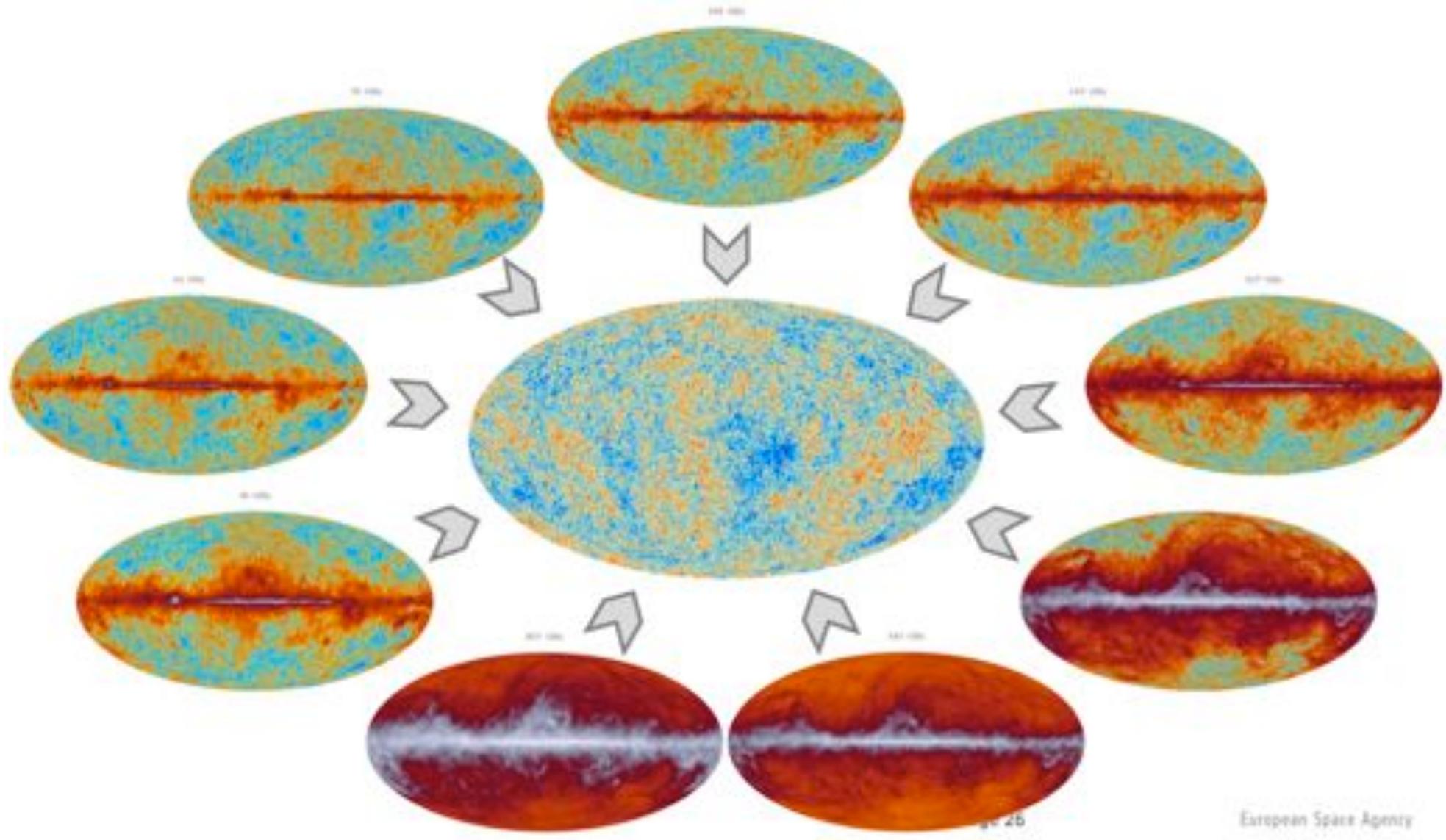
- sélectionné en 1996 par l'ESA – lancé en 2009
- HFI refroidi à 100 mK -> technologie de bolomètres
- 29 mois d'observation (but était 12 mois: nominal mission)
 - 5 relevés complets du ciel au lieu de 2 prévus



lancement de Planck & Herschel



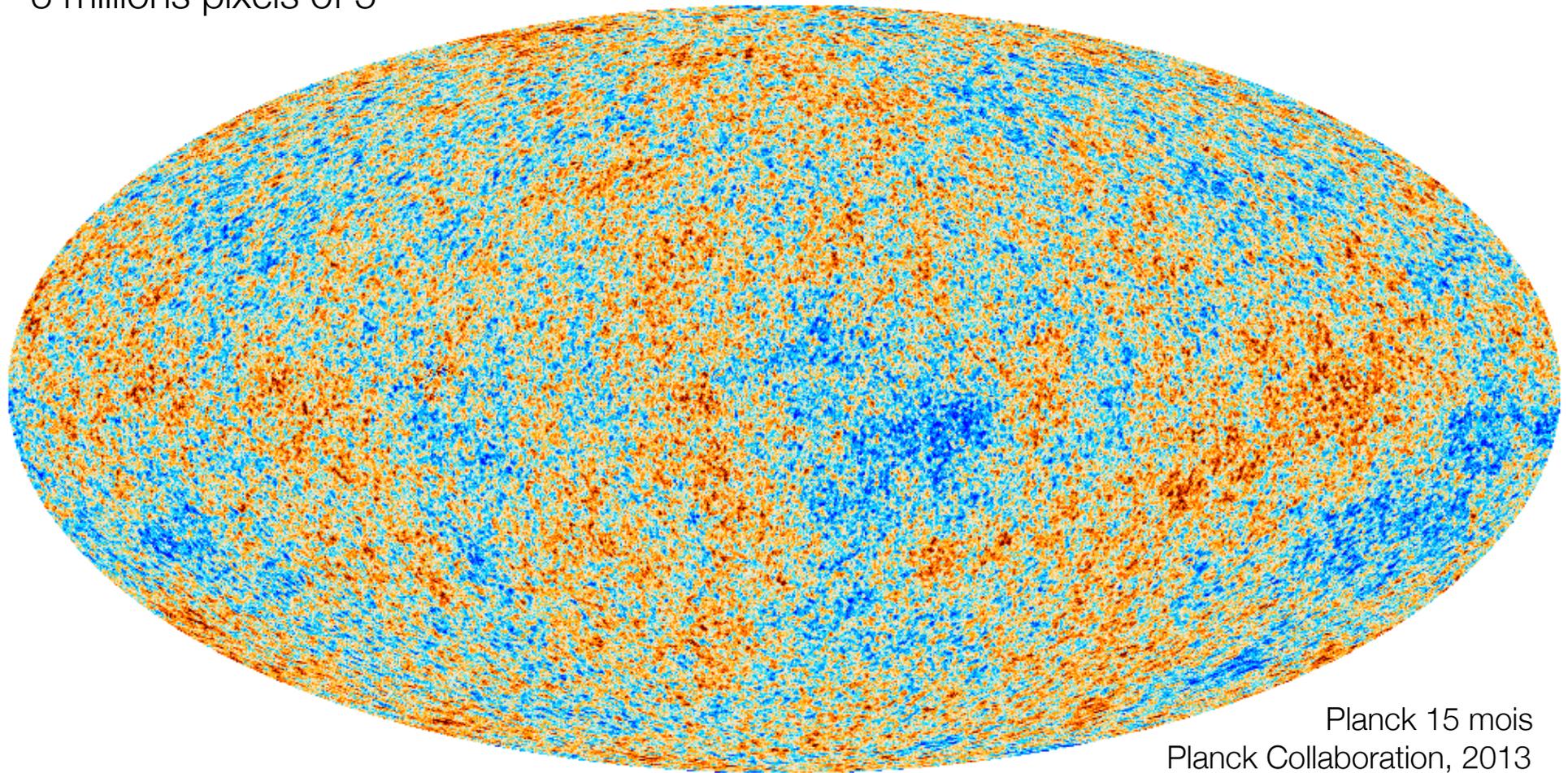
7.2 séparation des émissions du ciel



anisotropies de temperature du fond cosm.

LE RAYONNEMENT FOSSILE par PLANCK

6 millions pixels of 5'



... et une certaine couverture médiatique

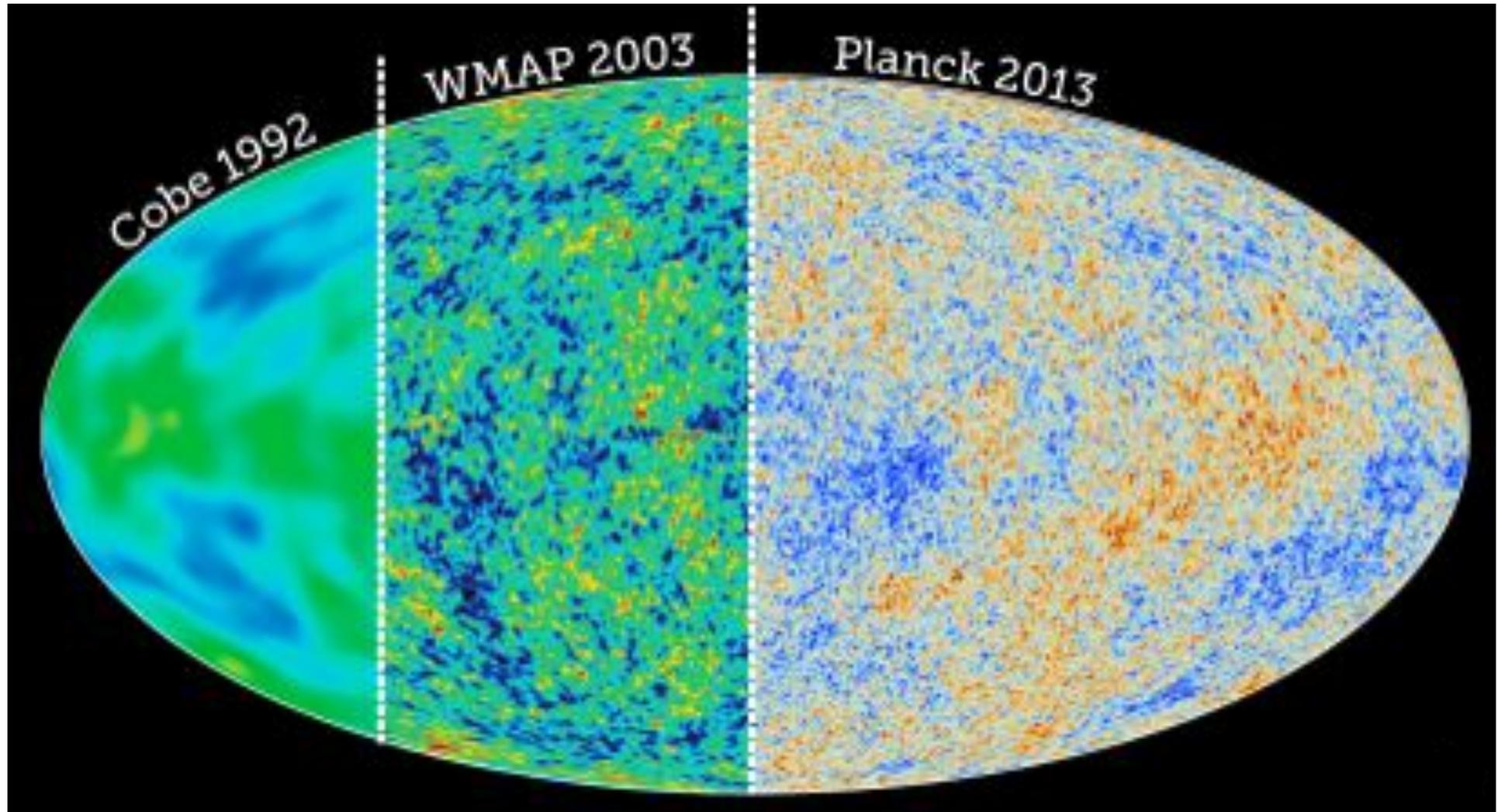


March 21st or 22nd, 2013

La mappemonde de l'Univers

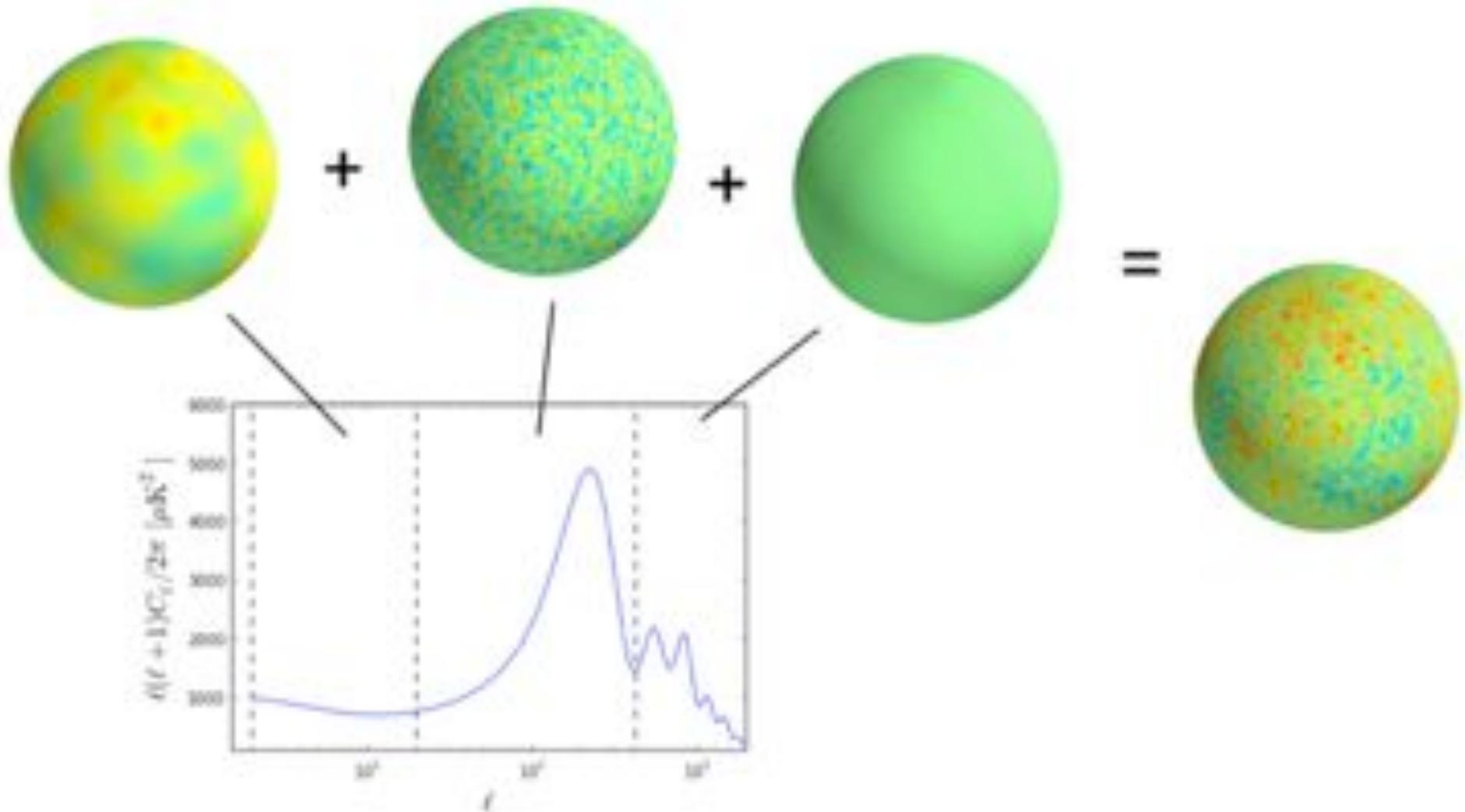
Hervé Dole, IAS - Univers et Cosmologie - 27 Août 2014 - E2PHY Clerf

7.3 améliorations avec le temps et technologie

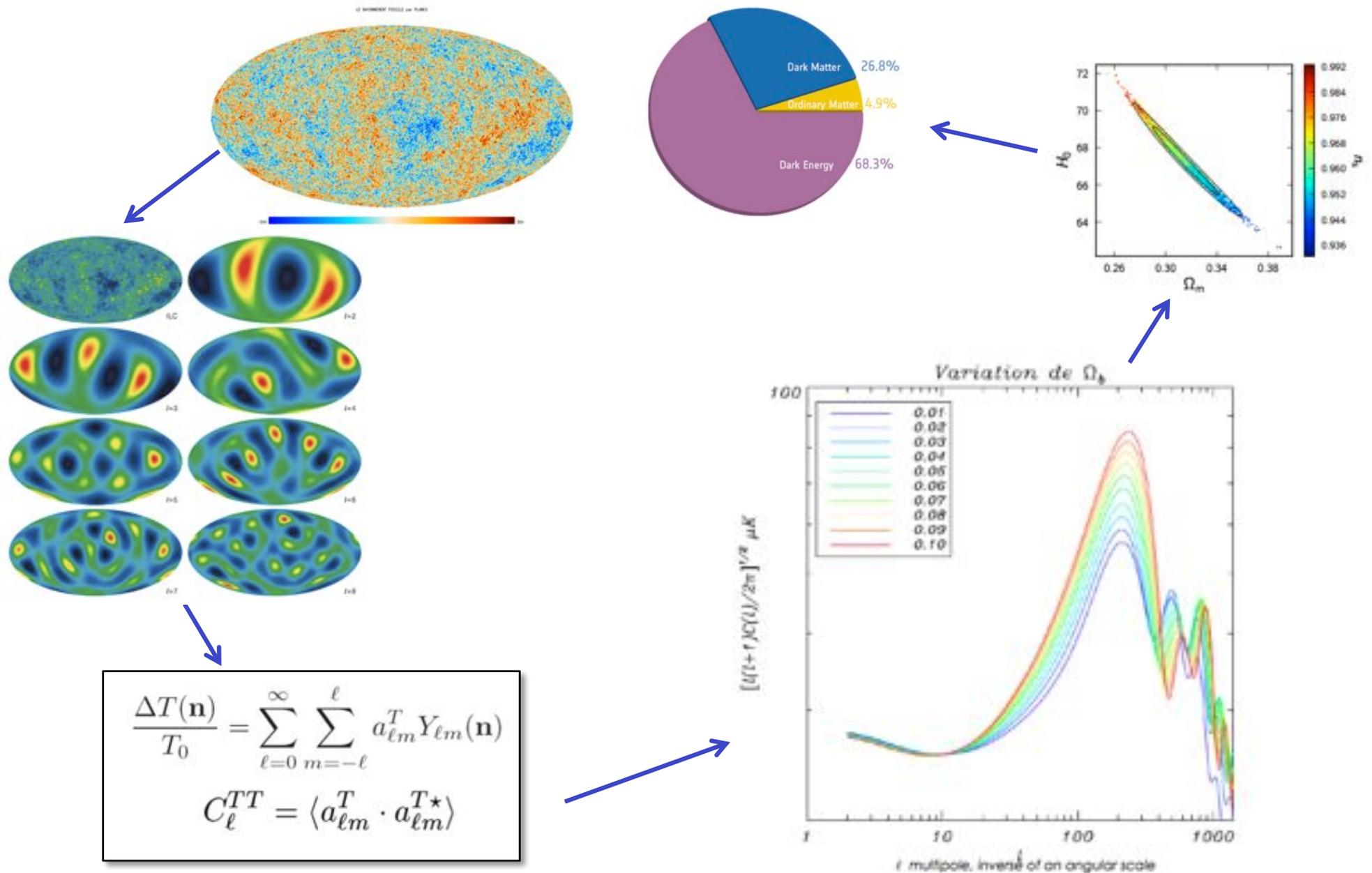


7.4 comment mesure t-on notre Univers ?

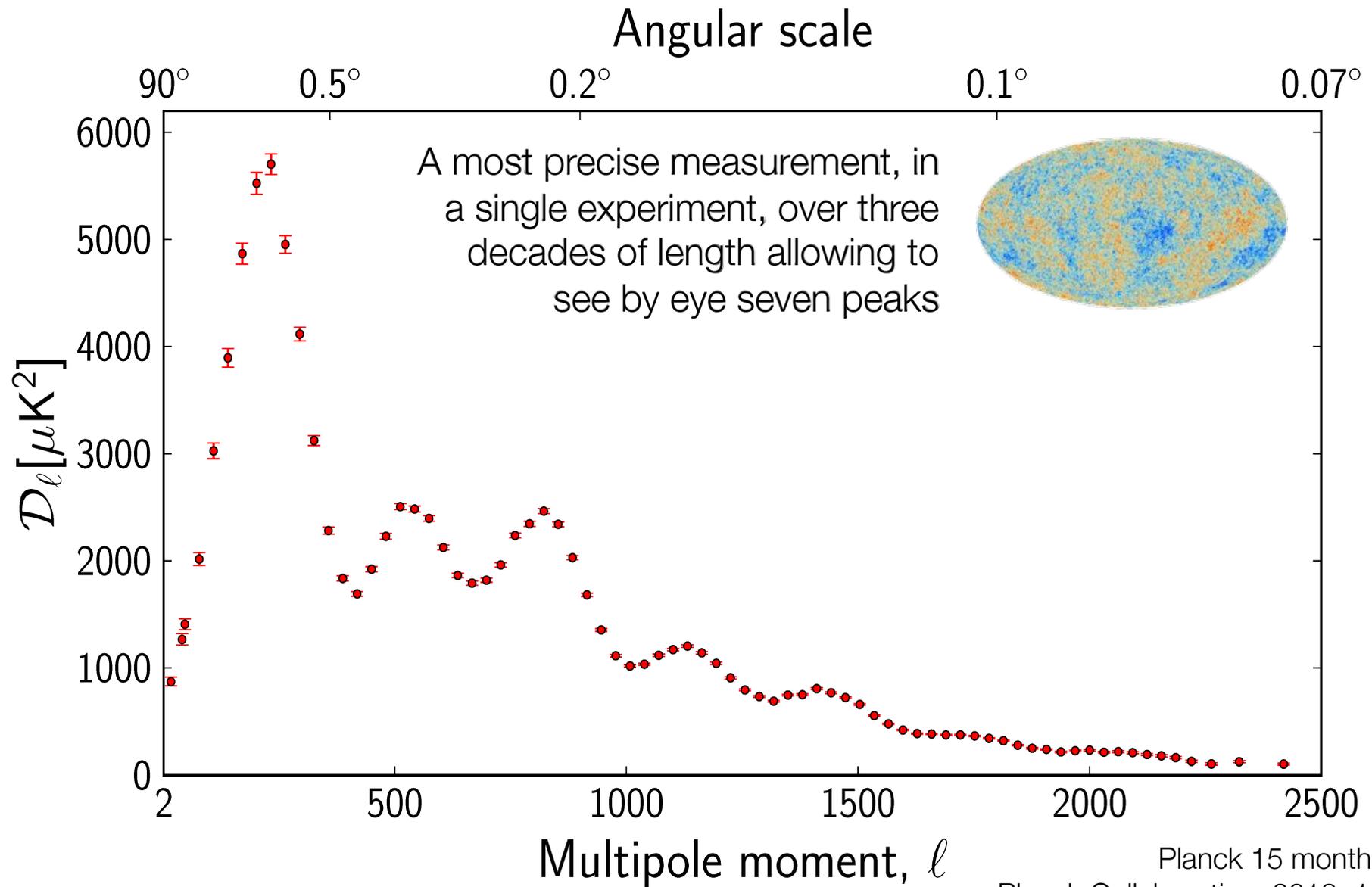
$$\langle a_{lm}^* a_{lm} \rangle = C_l$$



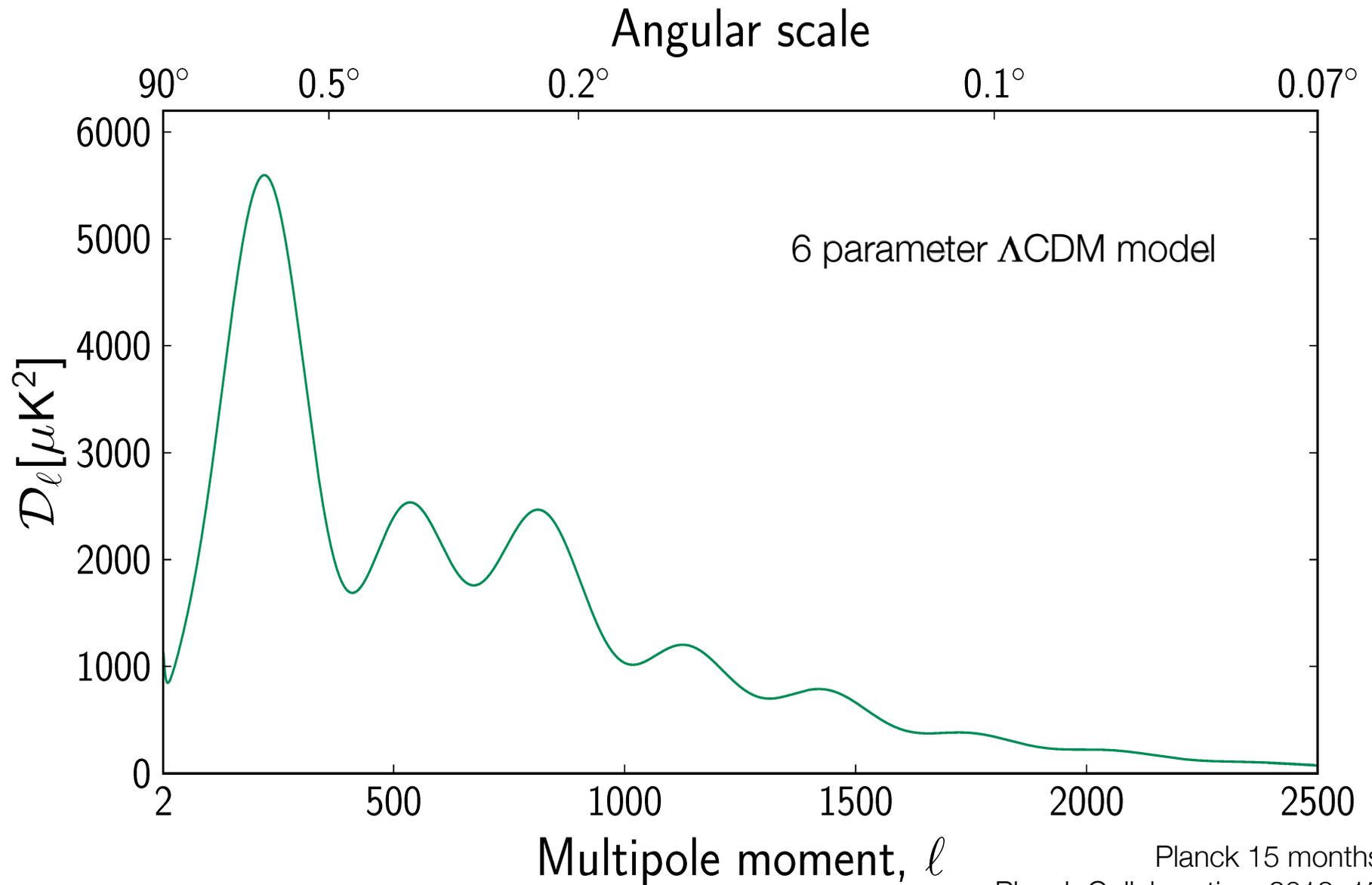
des images aux paramètres cosmologiques



the Planck spectrum of temperature anisotropies

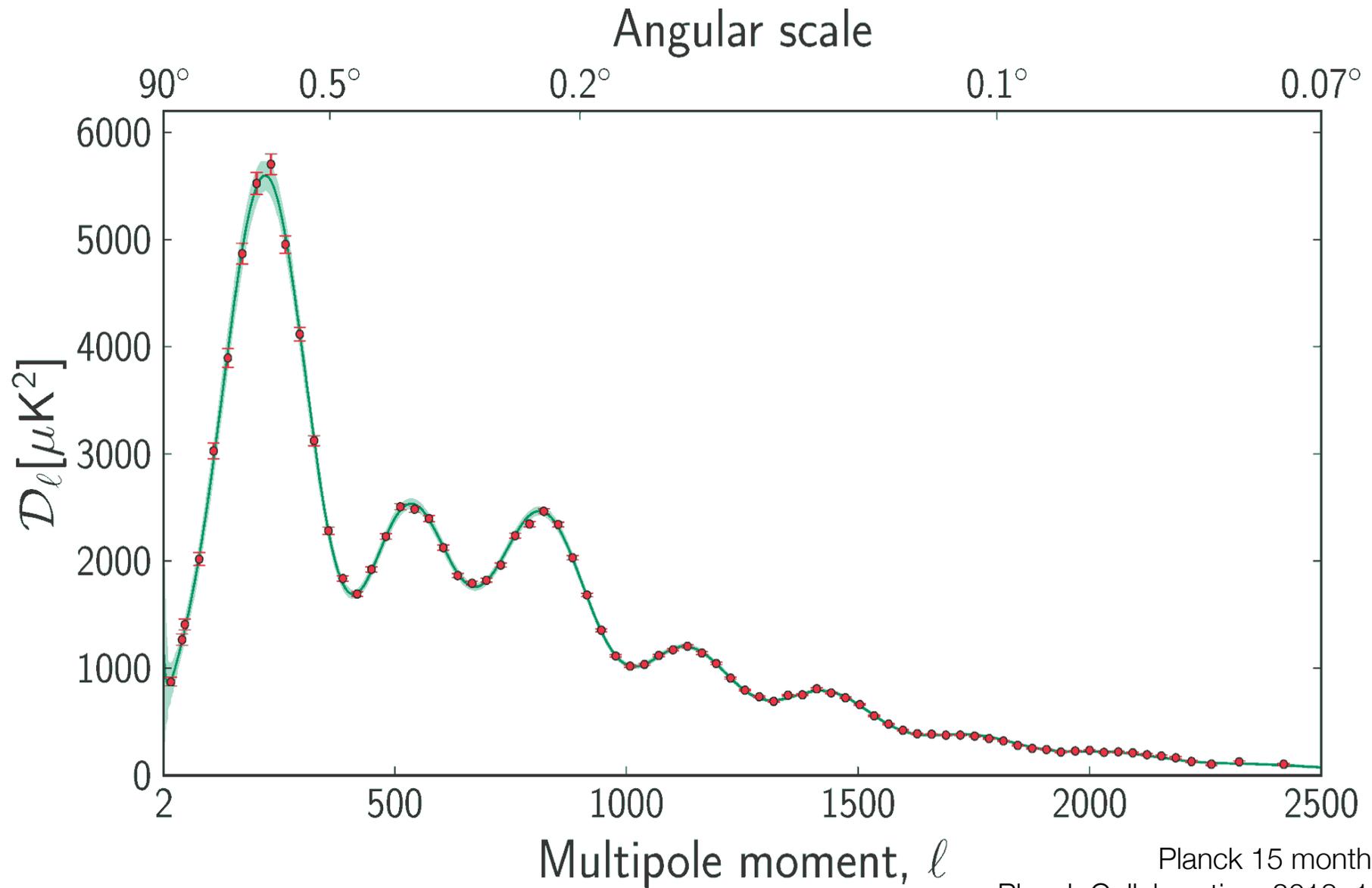


Planck best fitting theoretical model



Planck 15 months
Planck Collaboration, 2013, 15

theory confronts data – 1



7.5 le modèle standard Λ -CDM

Univers plat, avec constante cosmologique et matière noire froide

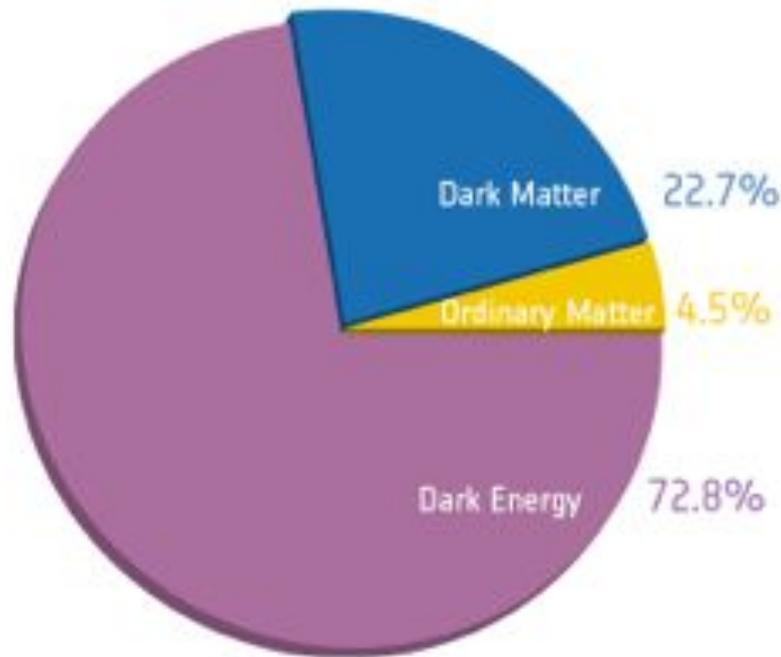
Seulement 6 paramètres.....

	Parameter	Best fit	68% limits
Quantité d'atomes	$\Omega_b h^2$	0.022068	0.02207 ± 0.00033
Quantité de matière noire	$\Omega_c h^2$	0.12029	0.1196 ± 0.0031
Lié à la distance que parcourt le son	$100\theta_{MC}$	1.04122	1.04132 ± 0.00068
Fraction de diffusion récente	τ	0.0925	0.097 ± 0.038
Variation d'échelles de la granulosité	n_s	0.9624	0.9616 ± 0.0094
Force de la granulosité	$\ln(10^{10} A_s)$	3.098	3.103 ± 0.072

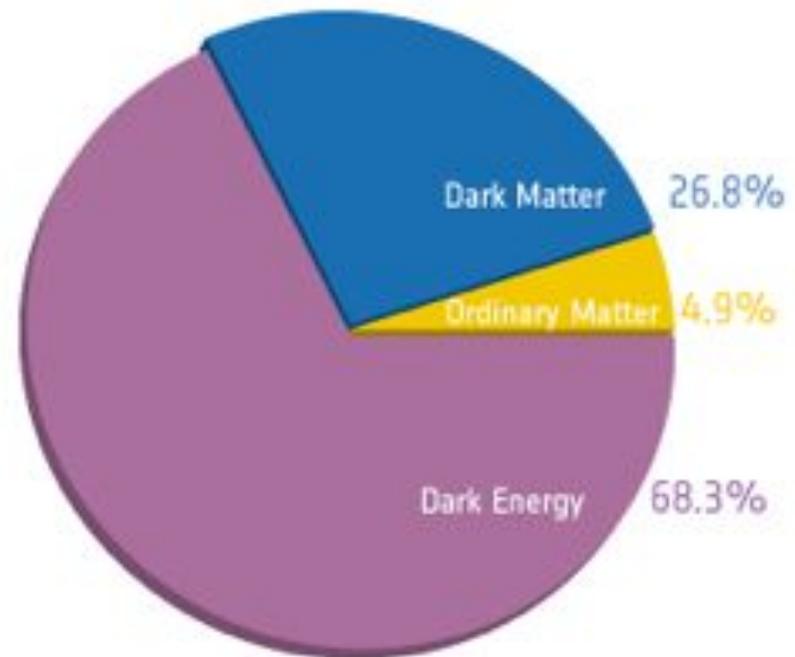
Et quelques paramètres dérivés

H_0	67.11	67.4 ± 1.4
Ω_Λ	0.6825	0.686 ± 0.020
Ω_m	0.3175	0.314 ± 0.020

l'Univers s'alourdit un peu ...



Before Planck



After Planck

La quantité de matière ordinaire et de matière noire doit être augmentée de 10% par rapport aux estimations précédentes.

Planck 15 months

... et vieillit

Parameter	Planck+WP		Planck+WP+highL		Planck+lensing+WP+highL		Planck+WP+highL+BAG	
	Best fit	68% limits	Best fit	68% limits	Best fit	68% limits	Best fit	68% limits
$\Omega_b h^2$	0.022032	0.02205 ± 0.00028	0.022069	0.02207 ± 0.00027	0.022199	0.02218 ± 0.00026	0.022161	0.02214 ± 0.00024
$\Omega_c h^2$	0.12038	0.1199 ± 0.0027	0.12025	0.1198 ± 0.0026	0.11847	0.1186 ± 0.0022	0.11889	0.1187 ± 0.0017
$100\theta_{MC}$	1.04119	1.04131 ± 0.00063	1.04130	1.04132 ± 0.00063	1.04146	1.04144 ± 0.00061	1.04148	1.04147 ± 0.00056
τ	0.0925	$0.089^{+0.012}_{-0.014}$	0.0927	$0.091^{+0.011}_{-0.014}$	0.0943	$0.090^{+0.011}_{-0.014}$	0.0952	0.092 ± 0.013
n_s	0.9619	0.9603 ± 0.0073	0.9582	0.9585 ± 0.0070	0.9624	0.9614 ± 0.0063	0.9611	0.9608 ± 0.0054
$\ln(10^{10} A_s)$	3.0980	$3.089^{+0.012}_{-0.017}$	3.0959	3.090 ± 0.025	3.0947	3.087 ± 0.024	3.0973	3.091 ± 0.025
A_{100}^{TB}	152	171 ± 60	209	212 ± 50	204	213 ± 50	204	212 ± 50
A_{150}^{TB}	63.5	54 ± 10	72.6	73 ± 8	72.2	72 ± 8	72.2	72 ± 8
A_{217}^{TB}	117.0	107^{+10}_{-10}	99.5	99 ± 10	60.2	58 ± 10	60.2	58 ± 10
A_{345}^{TB}	0.0	< 10.7	3.57	3.24 ± 0.83	3.25	3.24 ± 0.83	3.25	3.24 ± 0.83
A_{545}^{TB}	27.2	29^{+4}_{-4}	53.9	49.6 ± 5.0	52.3	50.0 ± 5.0	52.3	50.0 ± 5.0
A_{100}^{SZ}	6.80	...	5.17	$2.54^{+1.1}_{-1.8}$	4.64	$2.51^{+1.1}_{-1.8}$	4.64	$2.51^{+1.1}_{-1.8}$
r_{SZ+Cl}	0.916	> 0.850	0.825	$0.823^{+0.009}_{-0.017}$	0.814	0.825 ± 0.010	0.814	0.825 ± 0.010
r_{Cl+SZ}	0.406	0.42 ± 0.22	1.0000	> 0.930	1.0000	> 0.930	1.0000	> 0.930
γ^{Cl}	0.601	$0.53^{+0.13}_{-0.22}$	0.674	0.638 ± 0.081	0.656	0.643 ± 0.081	0.656	0.643 ± 0.081
ρ^{SZ+Cl}	0.03	...	0.000	< 0.409	0.000	< 0.389	0.000	< 0.410
A^{SZ}	0.9	...	0.89	$5.34^{+1.1}_{-1.9}$	1.14	$4.74^{+1.1}_{-2.1}$	1.14	$5.34^{+1.1}_{-1.9}$
Ω_s	0.6817	$0.685^{+0.011}_{-0.016}$	0.6830	$0.685^{+0.011}_{-0.016}$	0.6939	0.693 ± 0.013	0.6934	0.692 ± 0.010
σ_8	0.8347	0.829 ± 0.012	0.8322	0.828 ± 0.012	0.8271	0.8233 ± 0.0097	0.8286	0.826 ± 0.012
Ω_m	11.37	11.1 ± 1.1	11.38	11.1 ± 1.1	11.42	11.1 ± 1.1	11.52	11.3 ± 1.1
M_b	67.04	67.3 ± 1.2	67.15	67.3 ± 1.2	67.94	67.9 ± 1.0	67.77	67.80 ± 0.77
Age/Gyr	13.8242	13.817 ± 0.048	13.8170	13.813 ± 0.047	13.7914	13.794 ± 0.044	13.7965	13.798 ± 0.037
$100\theta_L$	1.04136	1.04147 ± 0.00062	1.04146	1.04148 ± 0.00062	1.04161	1.04159 ± 0.00060	1.04163	1.04162 ± 0.00056
τ_{ring}	147.36	147.49 ± 0.59	147.35	147.47 ± 0.59	147.68	147.67 ± 0.59	147.611	147.68 ± 0.45

km/s/Mpc

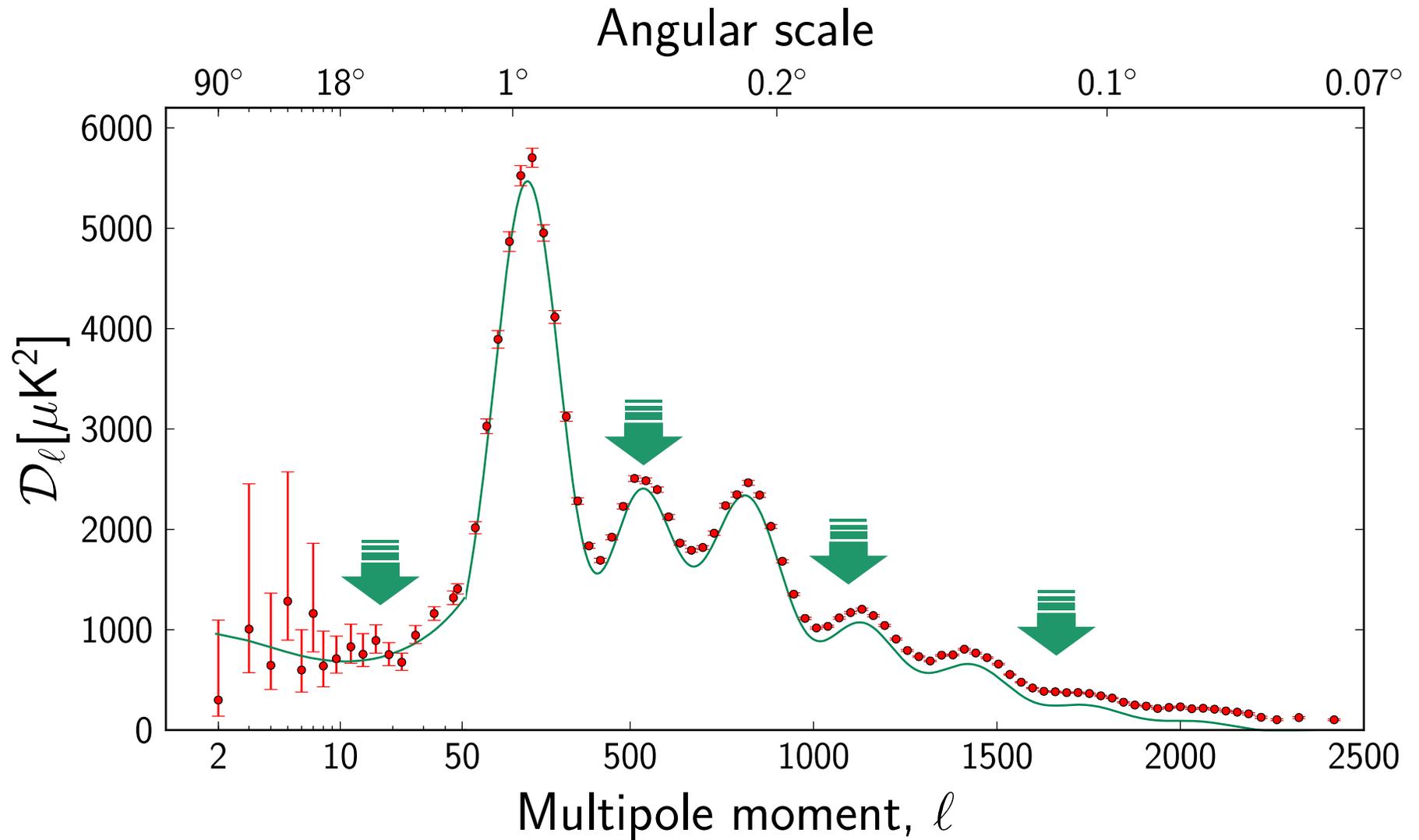
67.80 ± 0.77

Gyr

13.798 ± 0.037

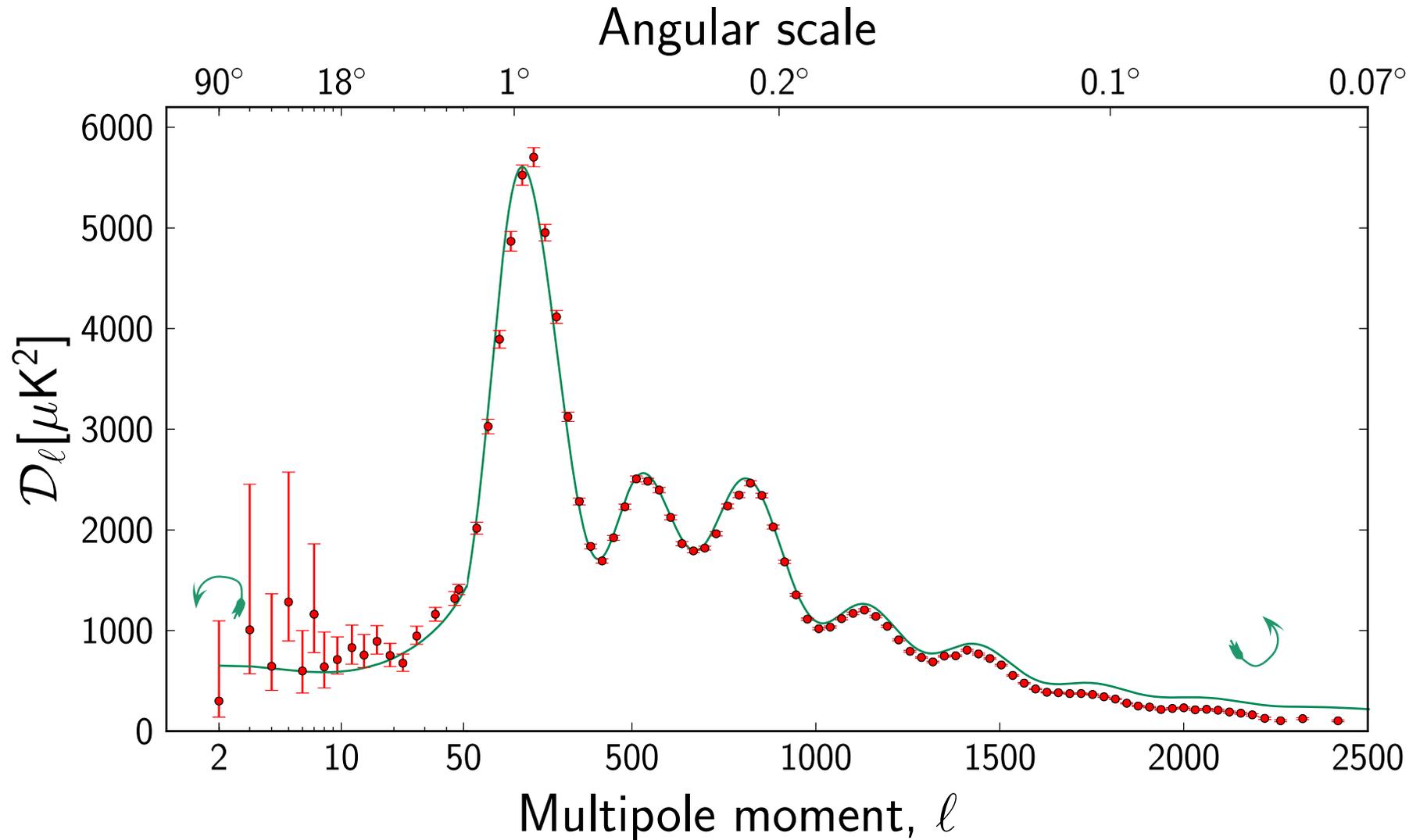
pourquoi ces paramètres ?

parce qu'ils permettent le meilleur ajustement aux données



pourquoi ces paramètres ?

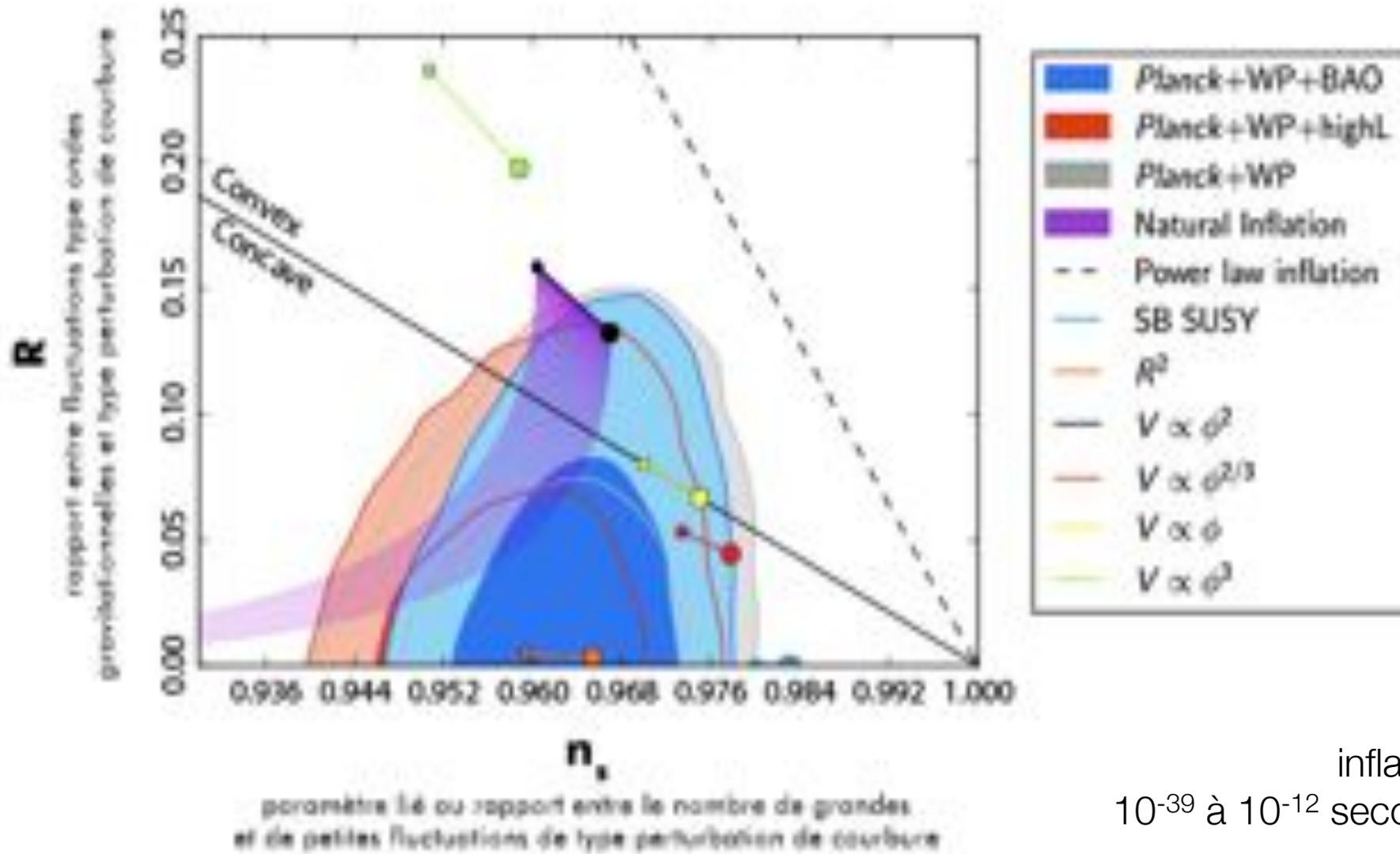
parce qu'ils permettent le meilleur ajustement aux données



petite démonstration: Univers dans un ordi

- avec CMBeasy: <http://www.cmbeasy.org> !!
- basé sur CMBfast

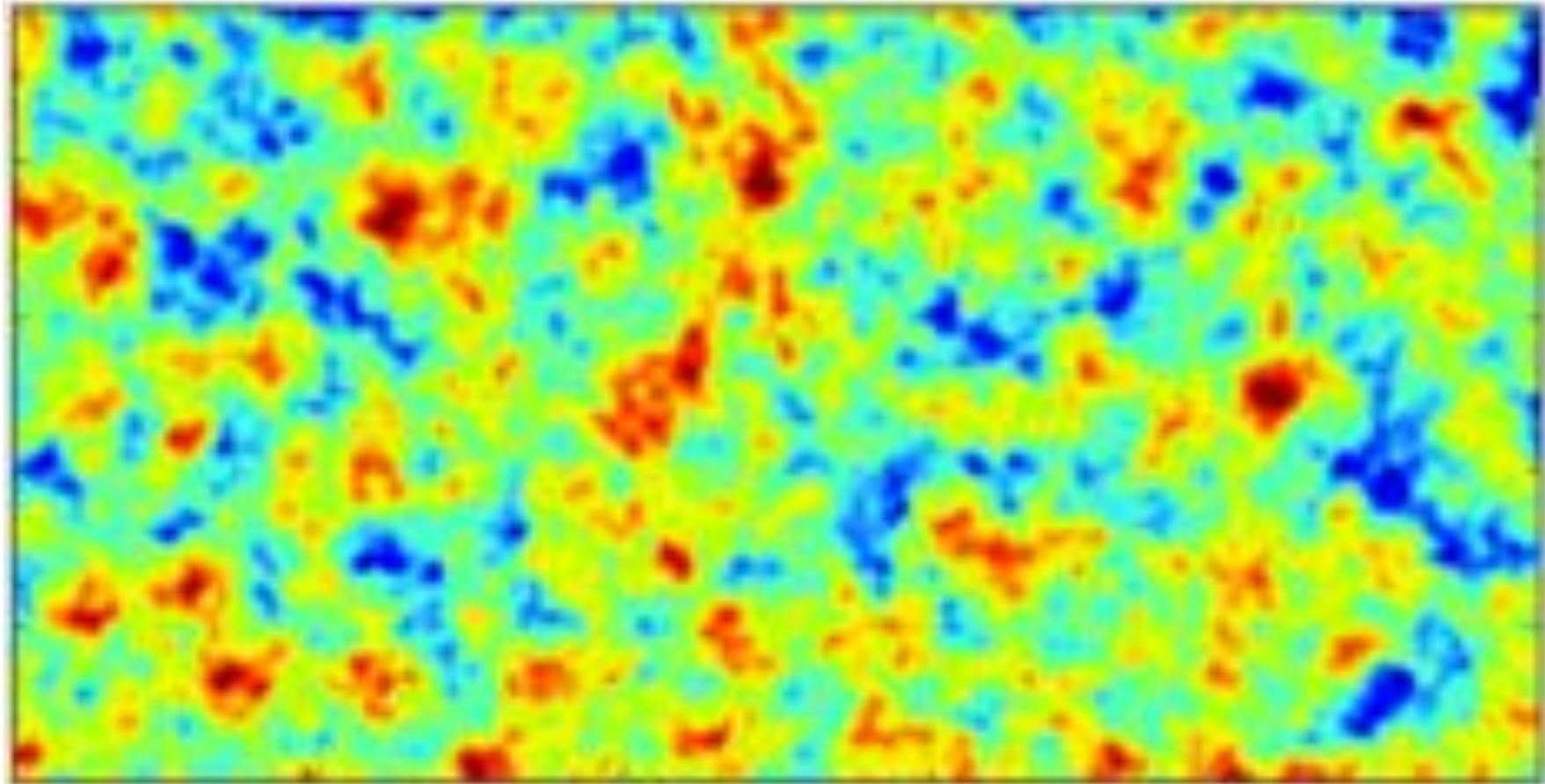
7.6 l'inflation à portée de main



inflation:
 10^{-39} à 10^{-12} seconde

7.7 la matière noire se révèle...

A simulated patch of CMB sky – before lensing

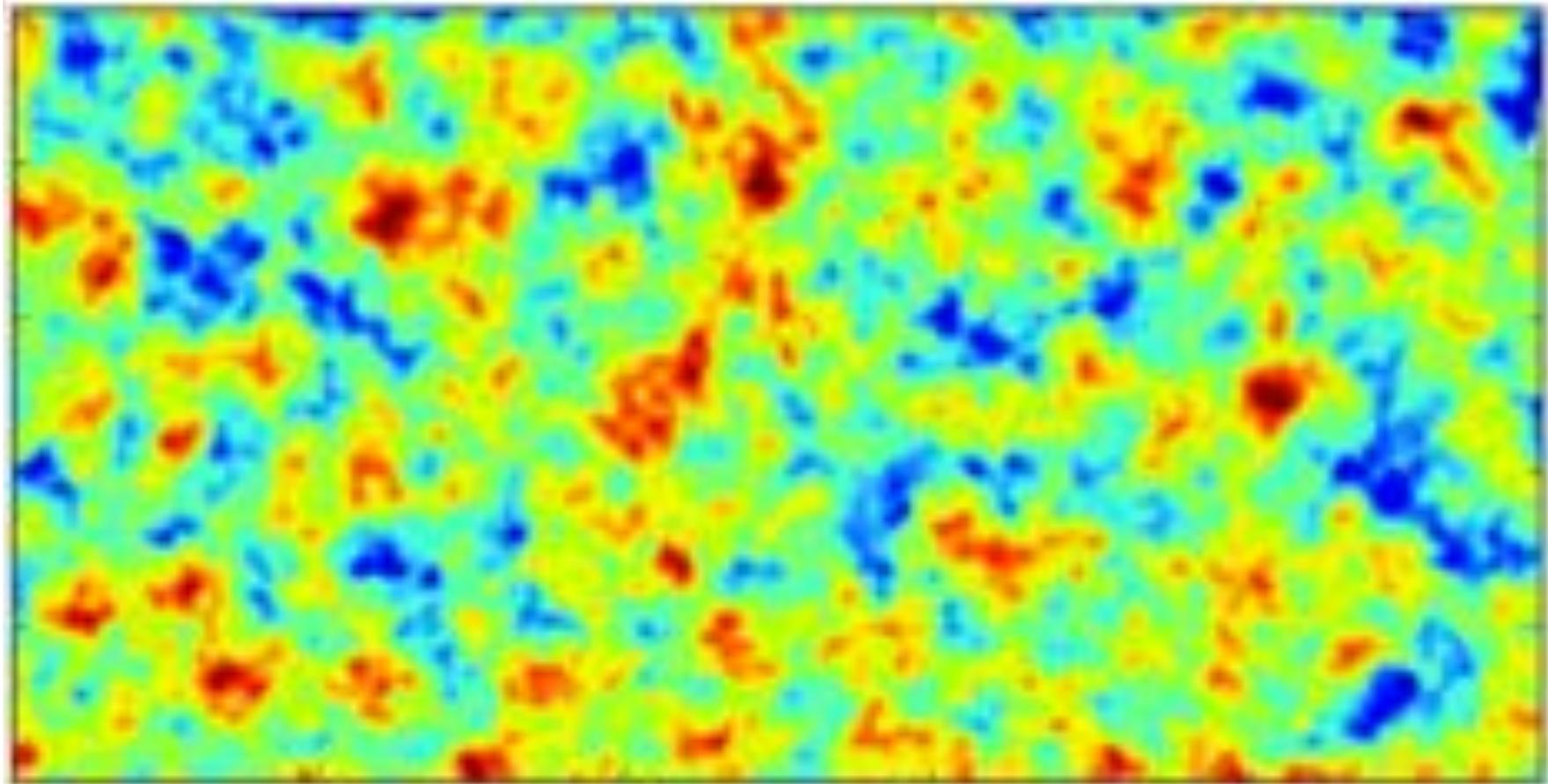


← 10° →

typical deflection: 2.4 arcmin

7.7 la matière noire se révèle...

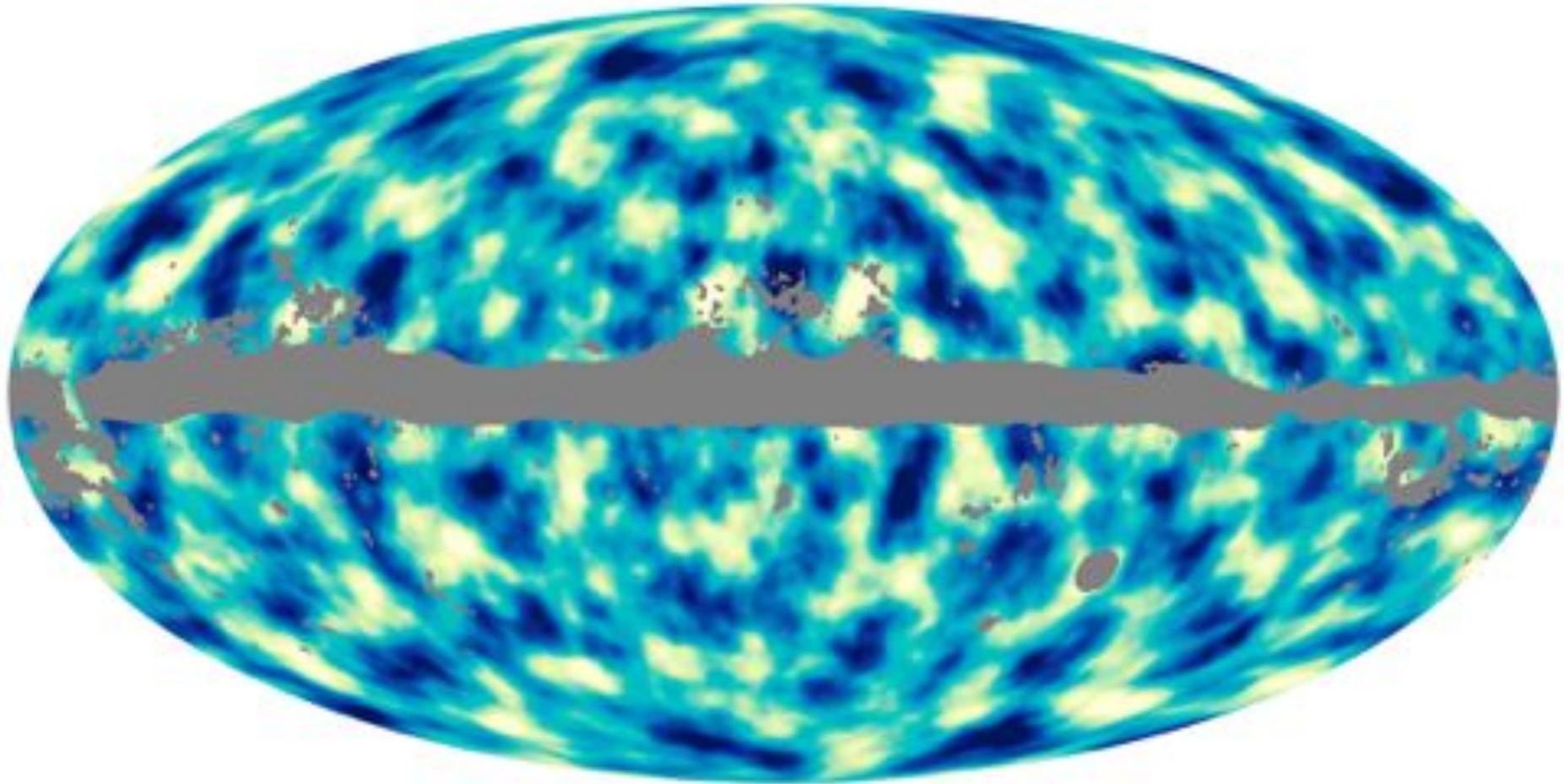
A simulated patch of CMB sky – *after lensing*



10°

typical deflection: 2.4 arcmin

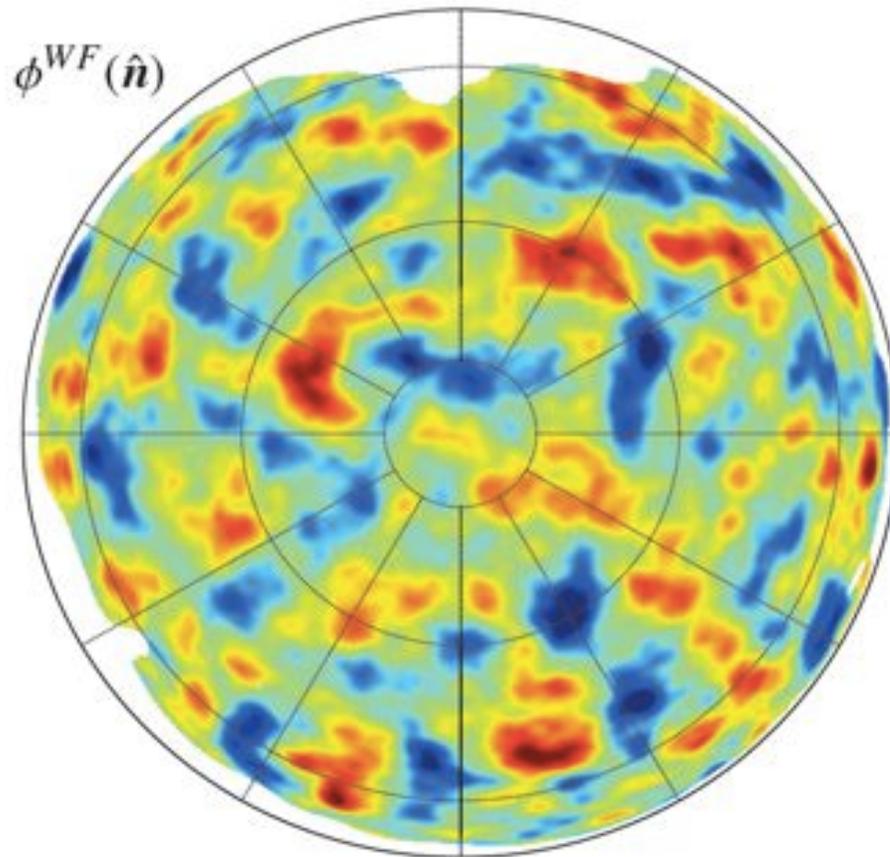
image Planck de la matière noire



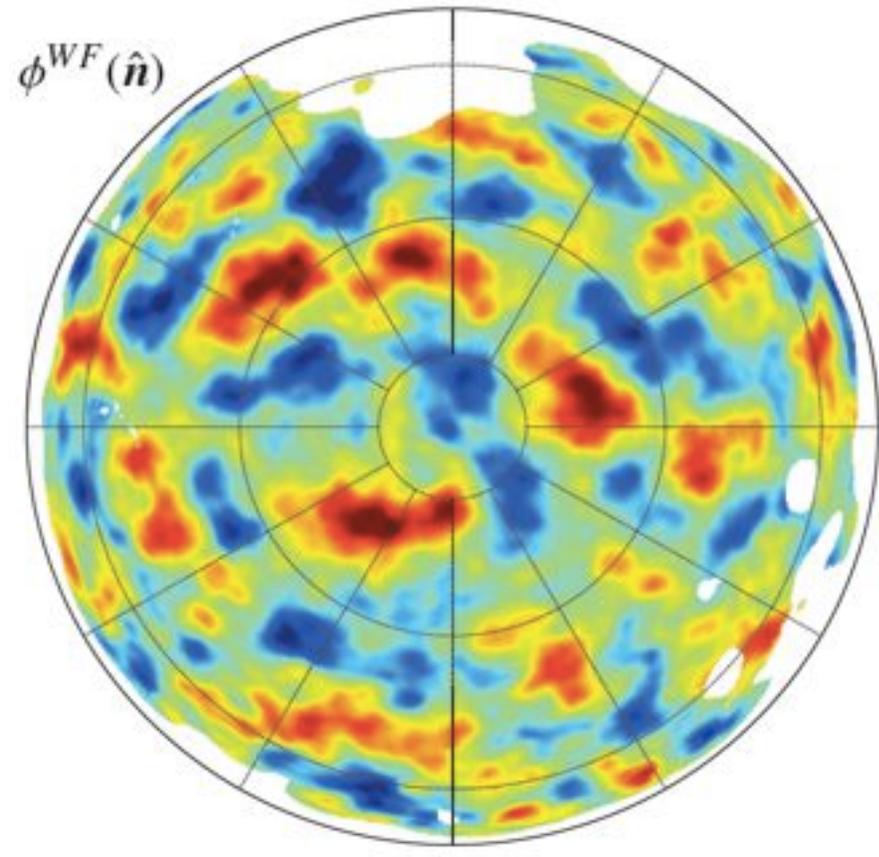
= Carte de la masse projetée sur la ligne de visée

Planck 15 months
Planck Collaboration, 2013, 17

Planck all-sky map of the dark matter



Galactic North



Galactic South

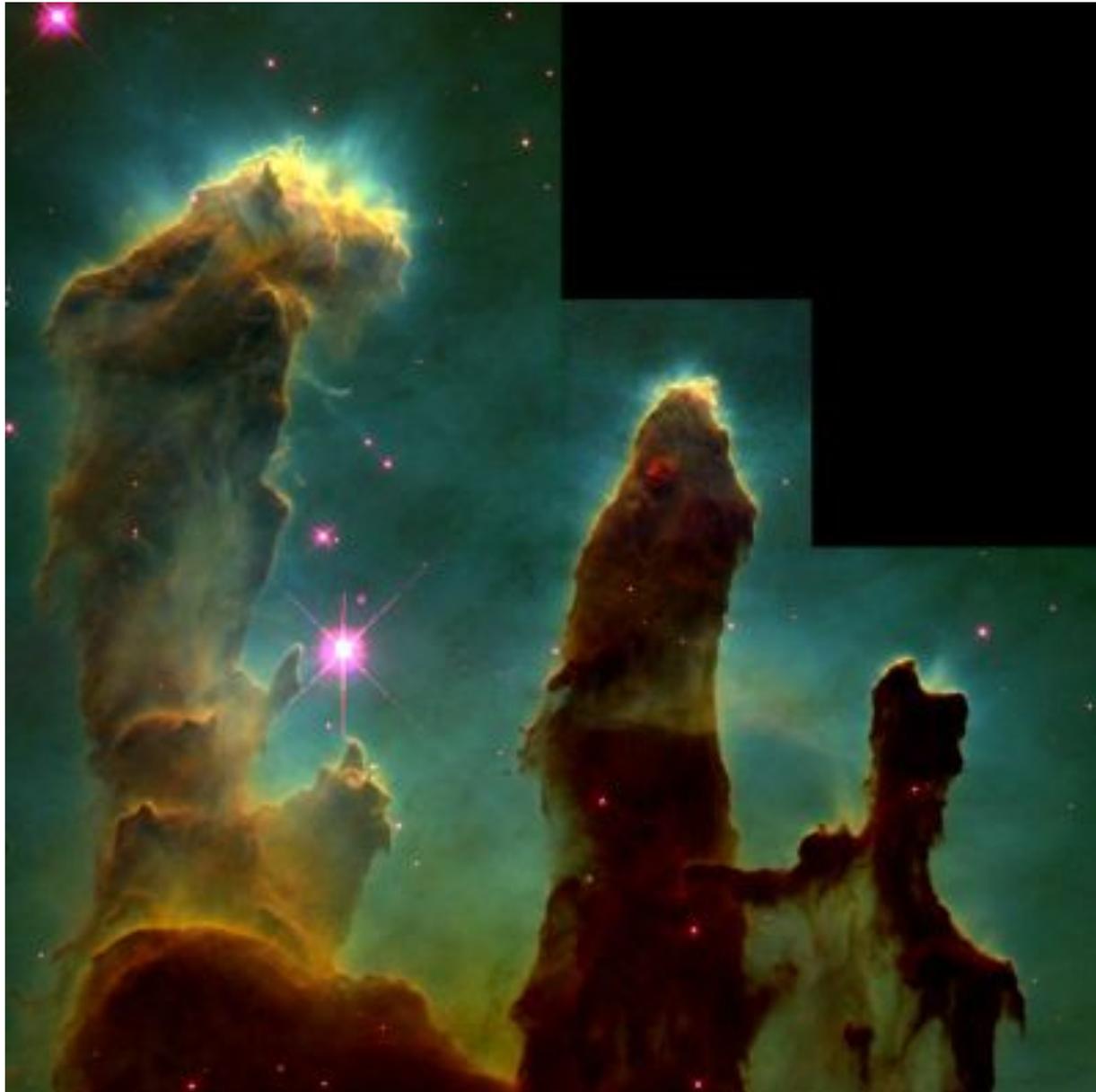
8. résumé

8. résumé

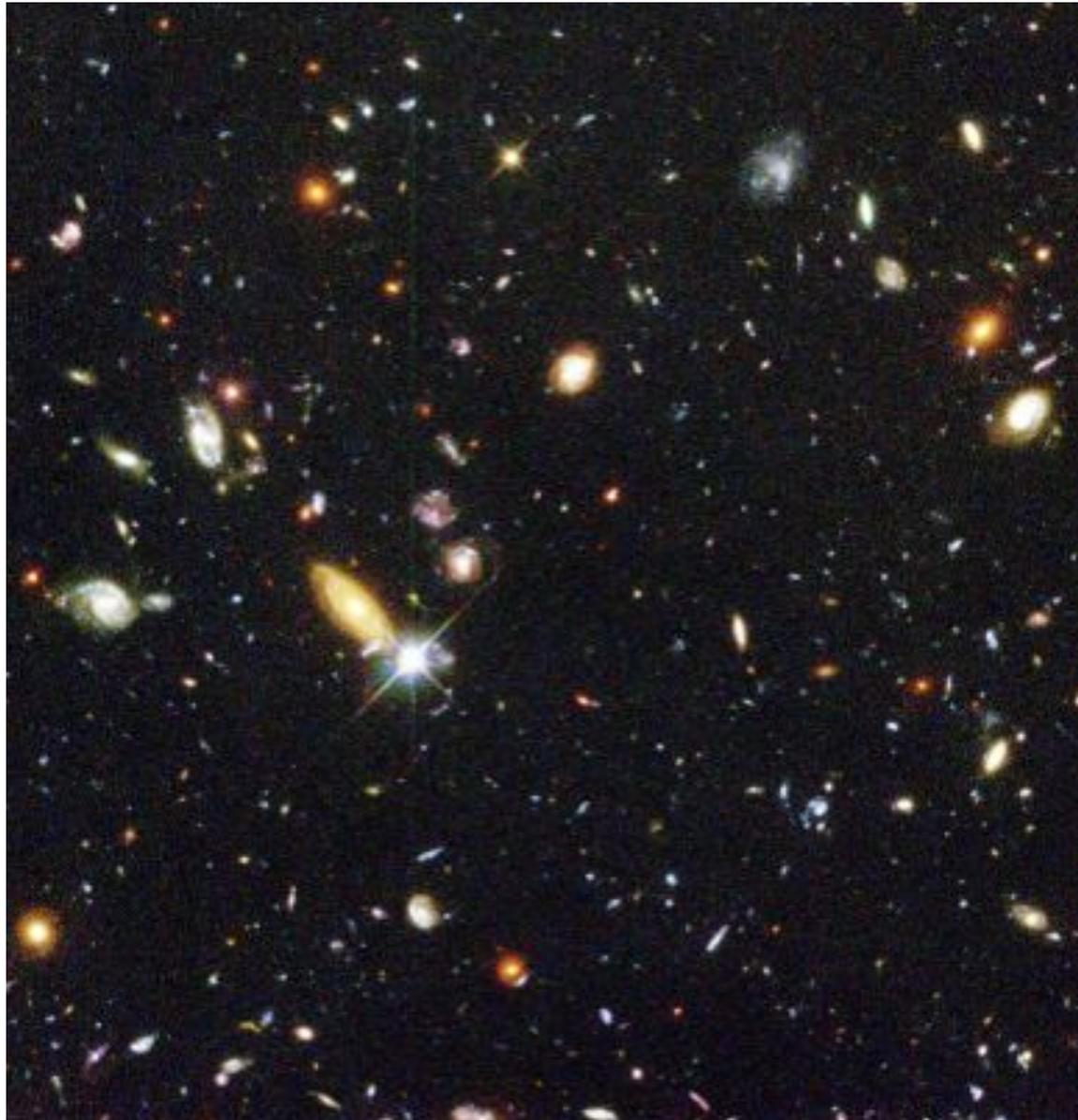
- but: comprendre la **structure**, l'**évolution** et les **lois physiques fondamentales** régissant l'univers et ses constituants
- **confrontation théorie – données**
- l'**astrophysique** est une science
- la **nuit noire**
 - est la signature de l'**expansion** de l'Univers
- la nuit n'est **pas** noire
 - présence de **rayonnements fossiles**
 - fond cosmologique: passé chaud et dense de l'Univers
 - fond extragalactique infrarouge: histoire des galaxies
- **modèle cosmologique** avec paramètres bien mesurés (par Planck)
- l'inflation cosmique à portée de main
- de nombreuses questions demeurent
 - inflation cosmique
 - nature de la matière noire ?
 - nature de l'énergie sombre ?

9. remarques finales

remarques finales



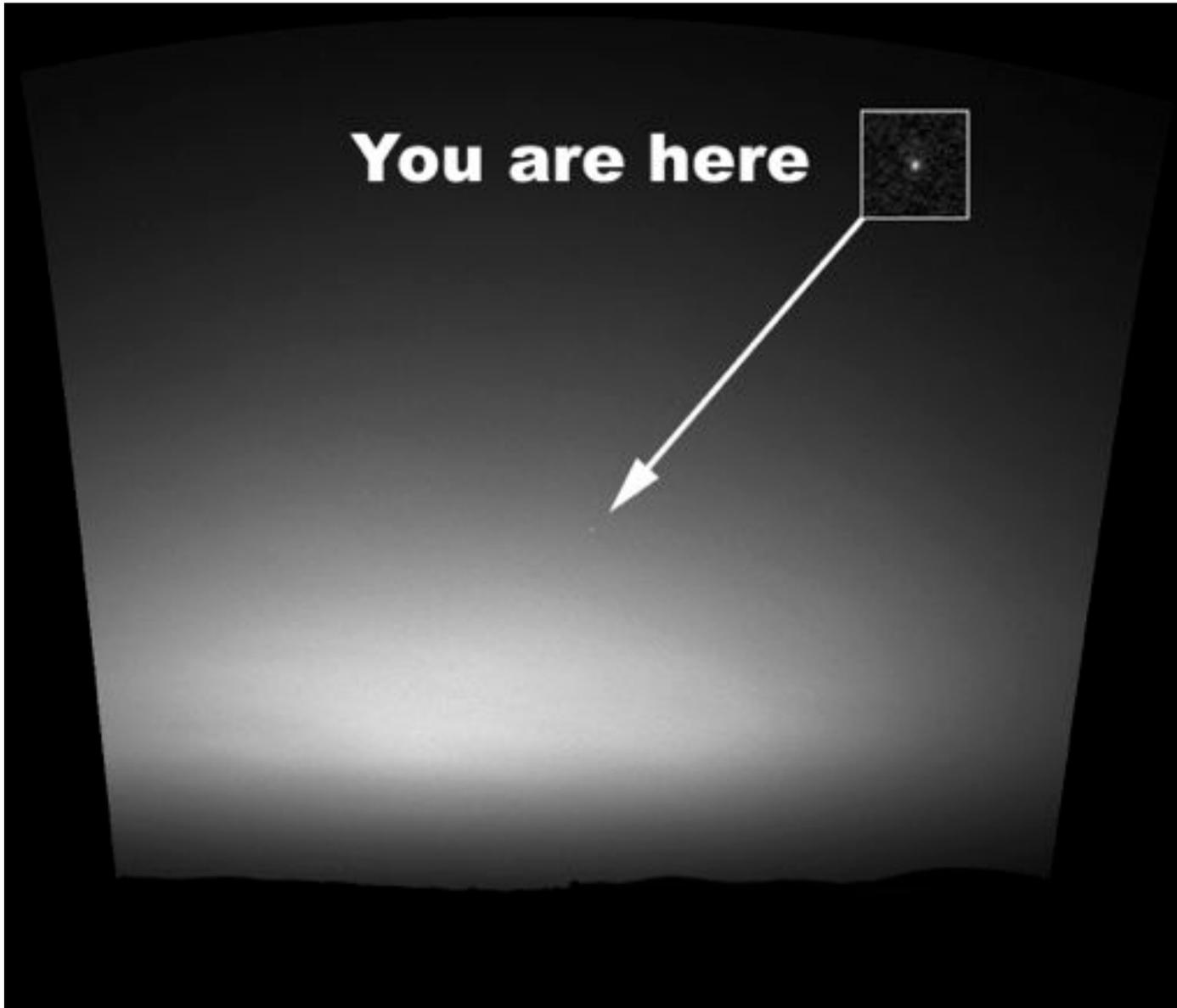
remarques finales



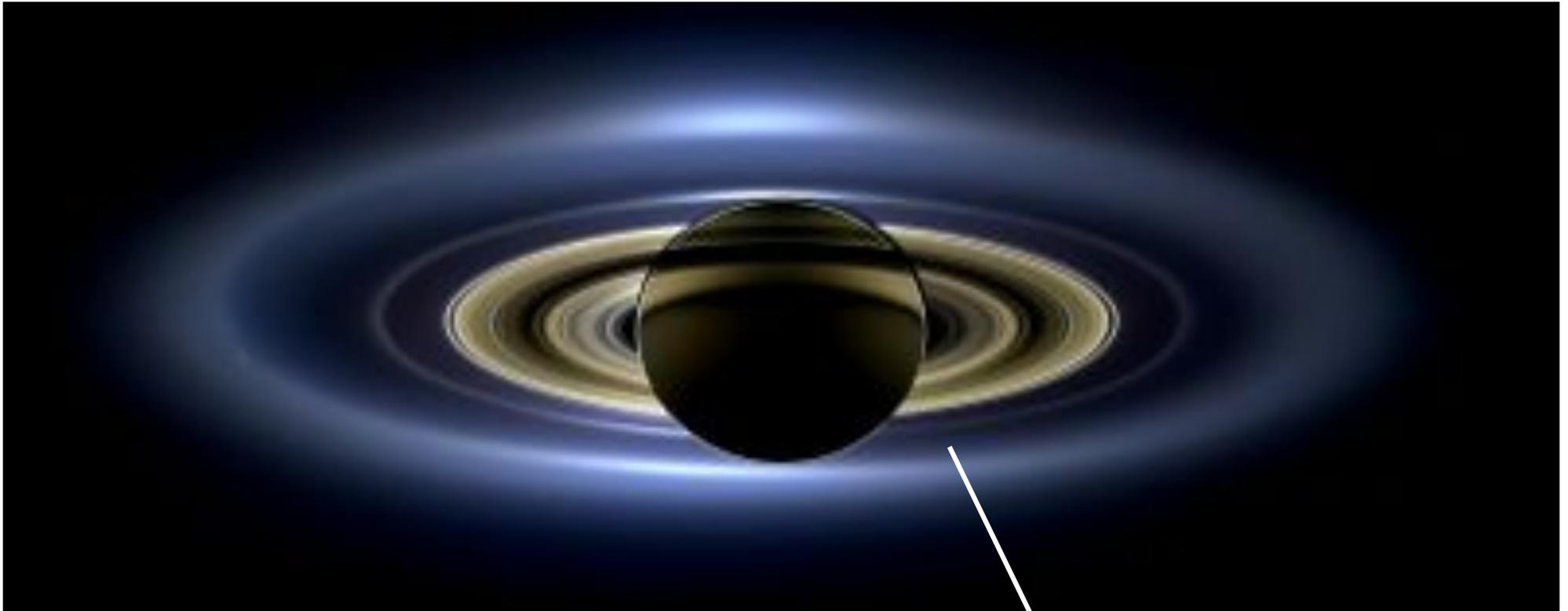
remarques finales



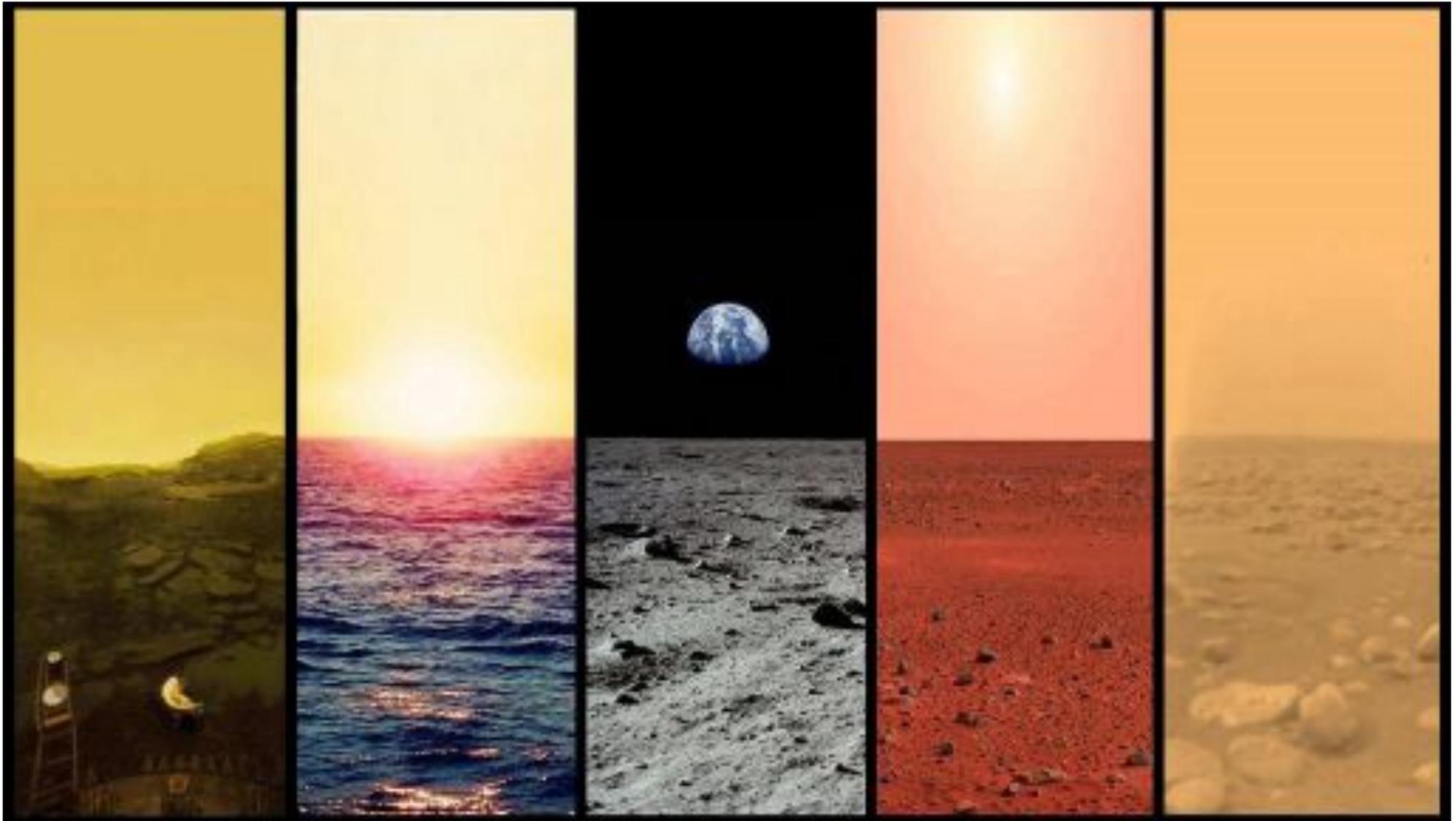
remarques finales



remarques finales



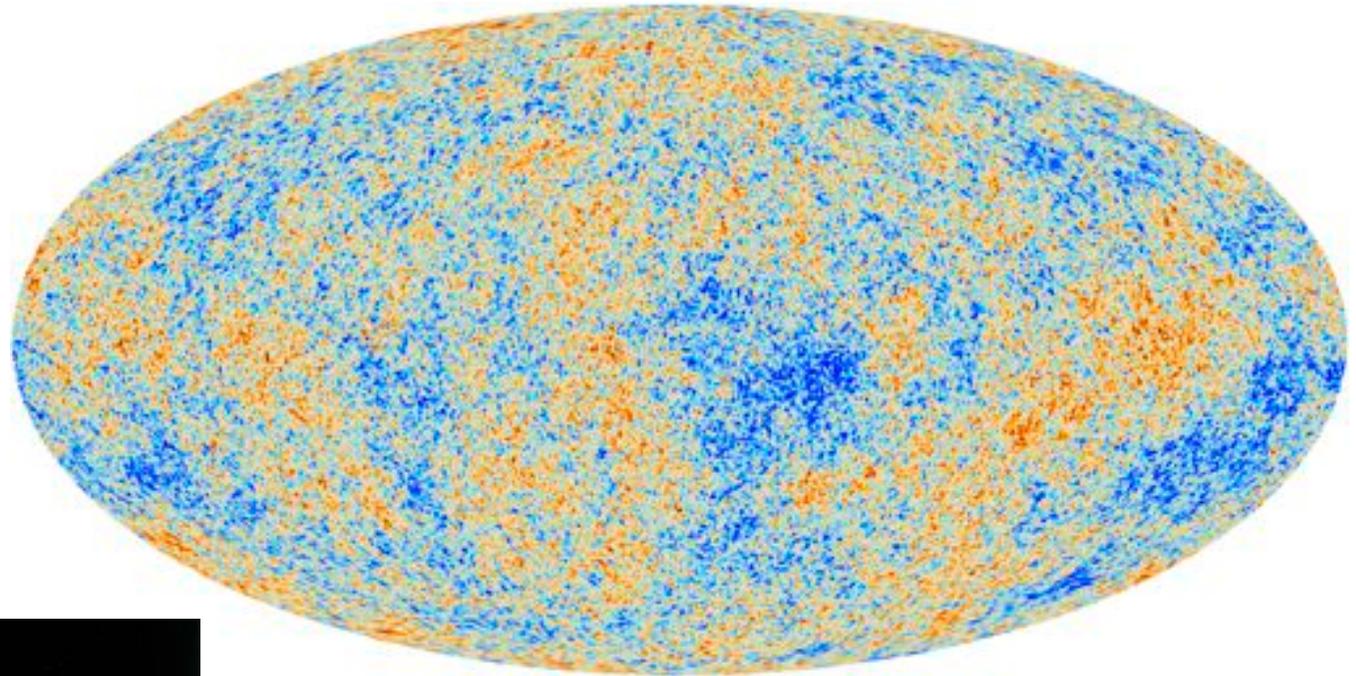
remarques finales



remarques finales



remarques finales



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

Planck 2013
Apollo VIII, Noël 1968- Lovell, Anders, Borman