

# 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

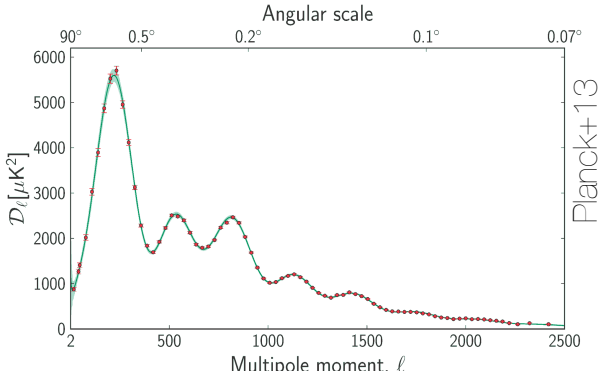
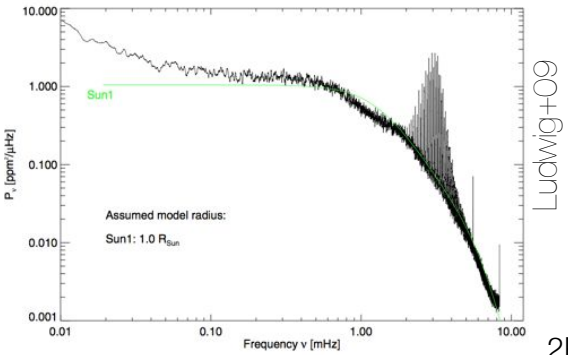
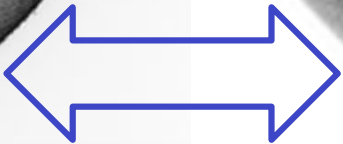
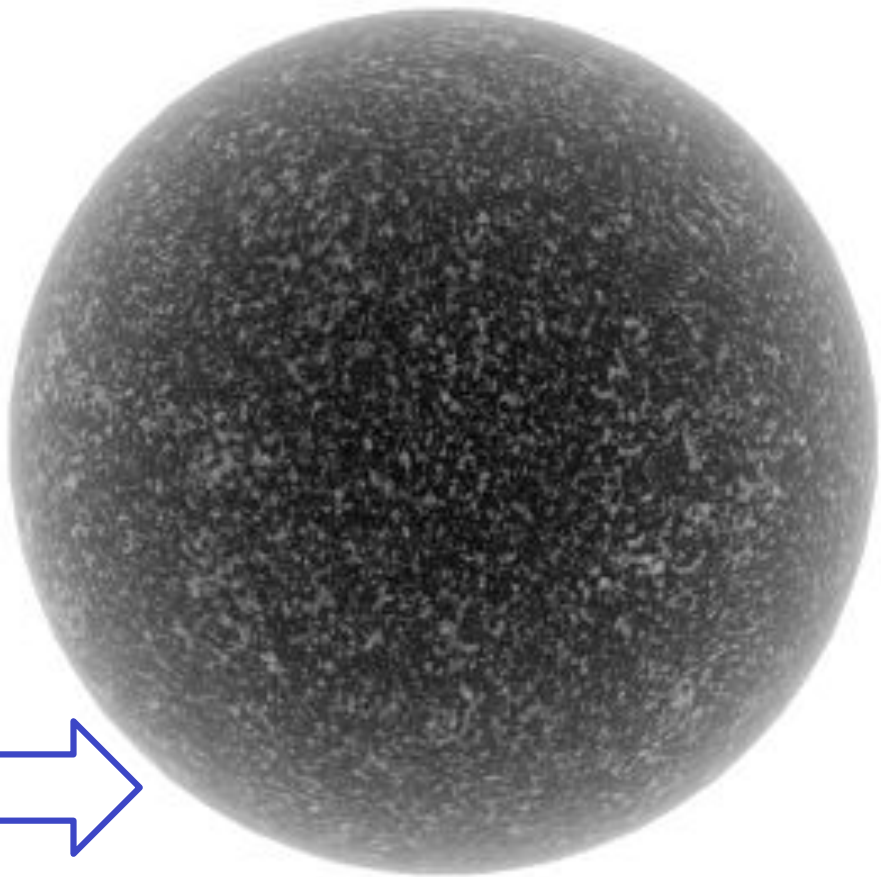
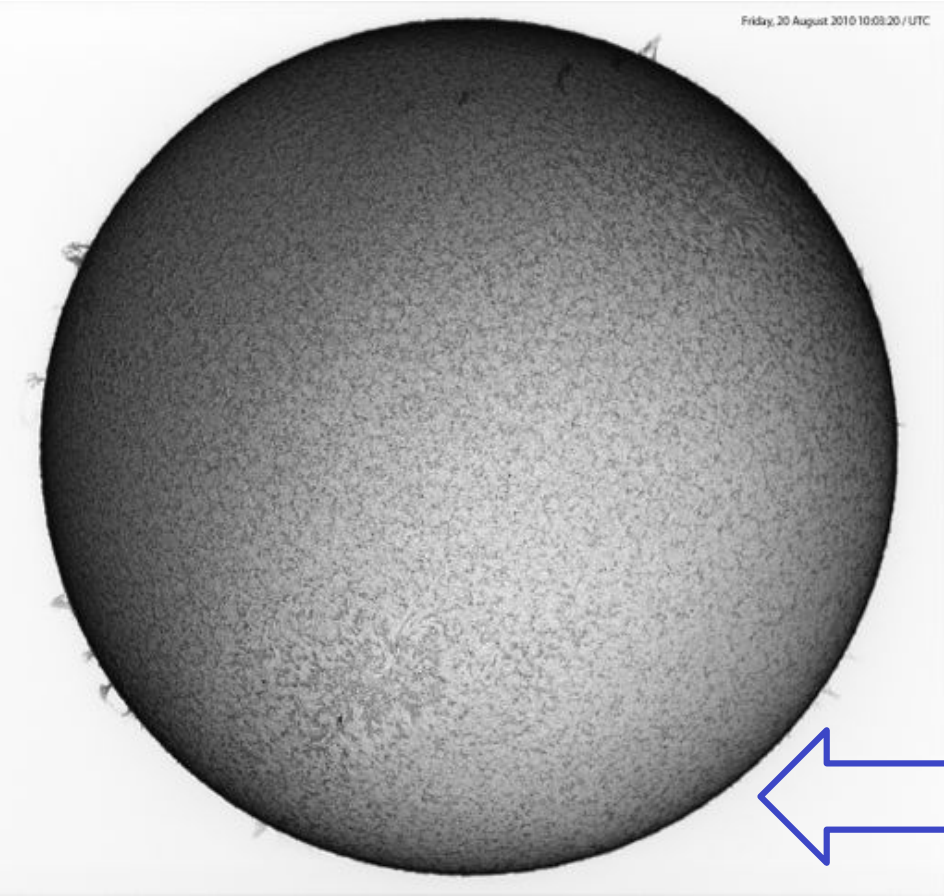


# notre ambition scientifique

---

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<sup>è</sup>), **Chéseaux** (17<sup>è</sup>), Halley (18<sup>è</sup>), **Olbers** (19<sup>è</sup>)
- Herschel, Kant, Proctor, Fournier d'Albe, Charlier
- **Poe** (19<sup>è</sup>), **Kelvin** (19<sup>è</sup>)
- 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

---

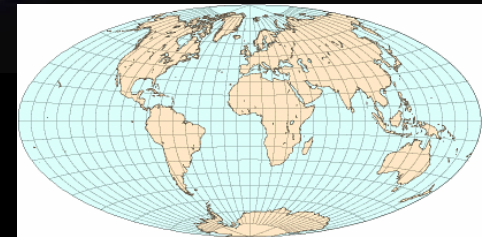
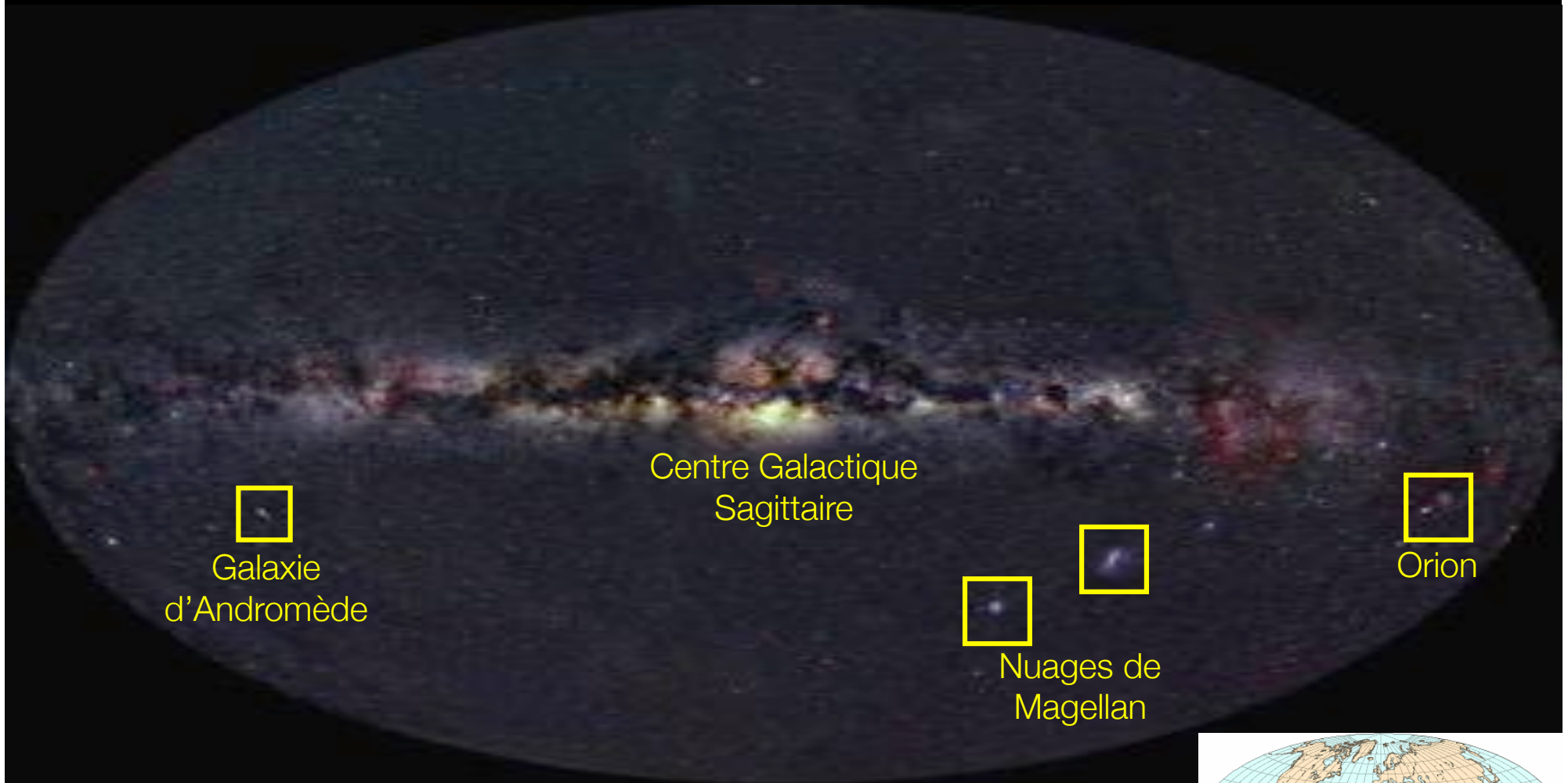
2. à quoi ressemble le ciel ?

# pourquoi la nuit est-elle noire ?



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

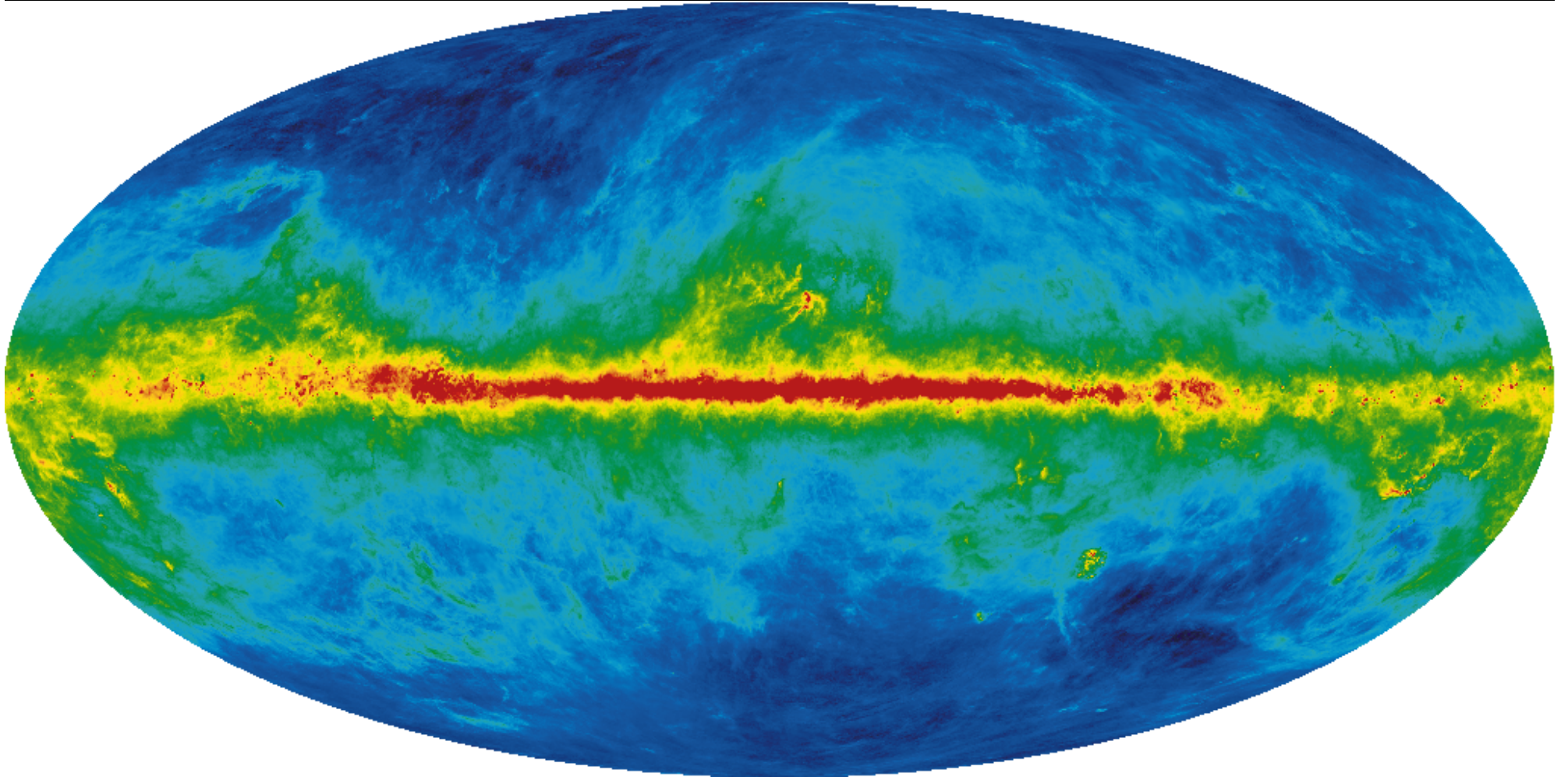
# le ciel: visible



Axel Mellinger

[http://canopus.physik.uni-potsdam.de/~axm/mwpan/mwpan\\_web.html](http://canopus.physik.uni-potsdam.de/~axm/mwpan/mwpan_web.html)

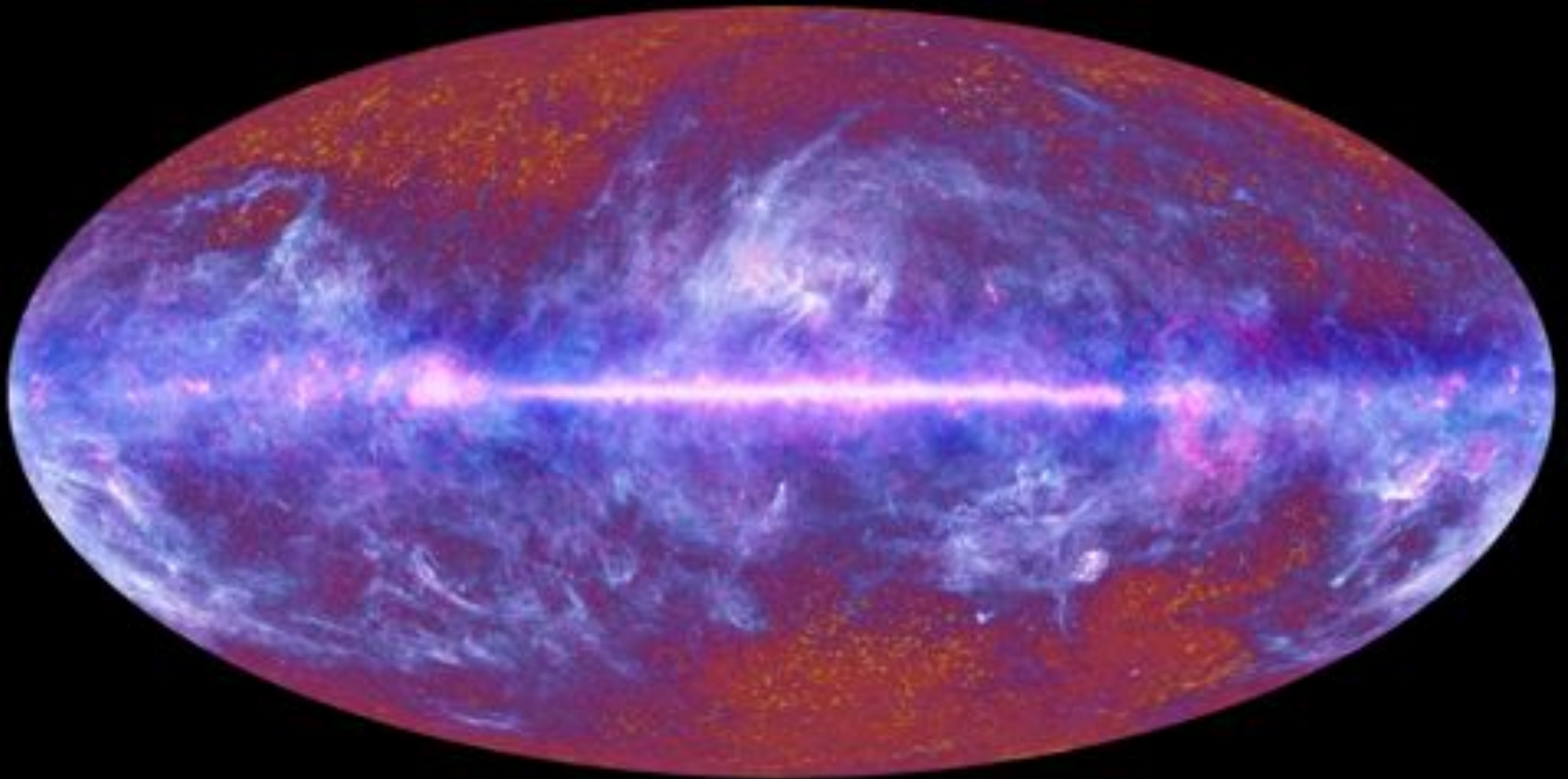
# le ciel: infrarouge lointain



IRAS 100um IRIS

# le ciel: ondes millimétriques (ou micro-ondes)

---



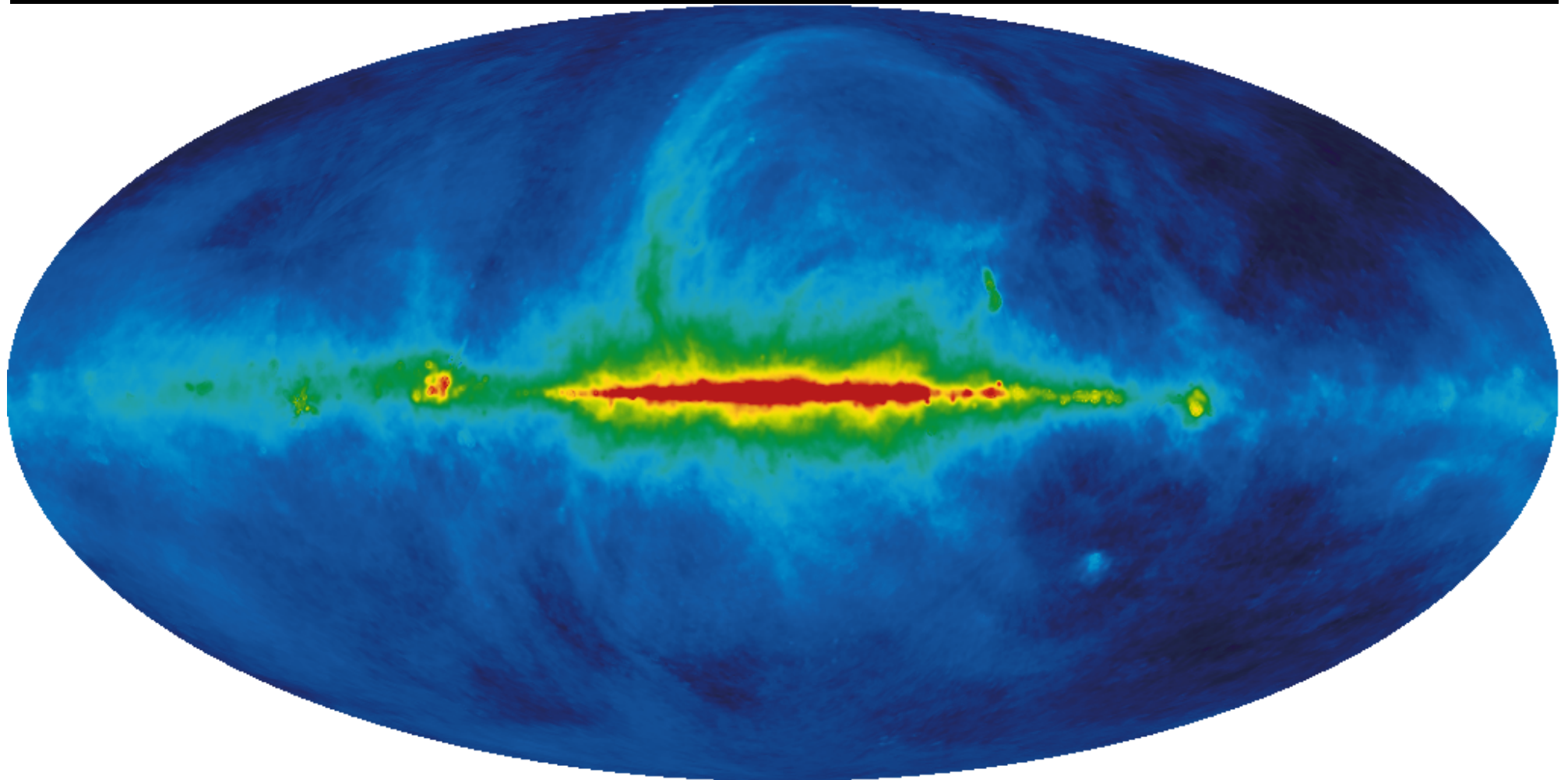
The PLANCK one-year all-sky survey



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

# le ciel: radio

---

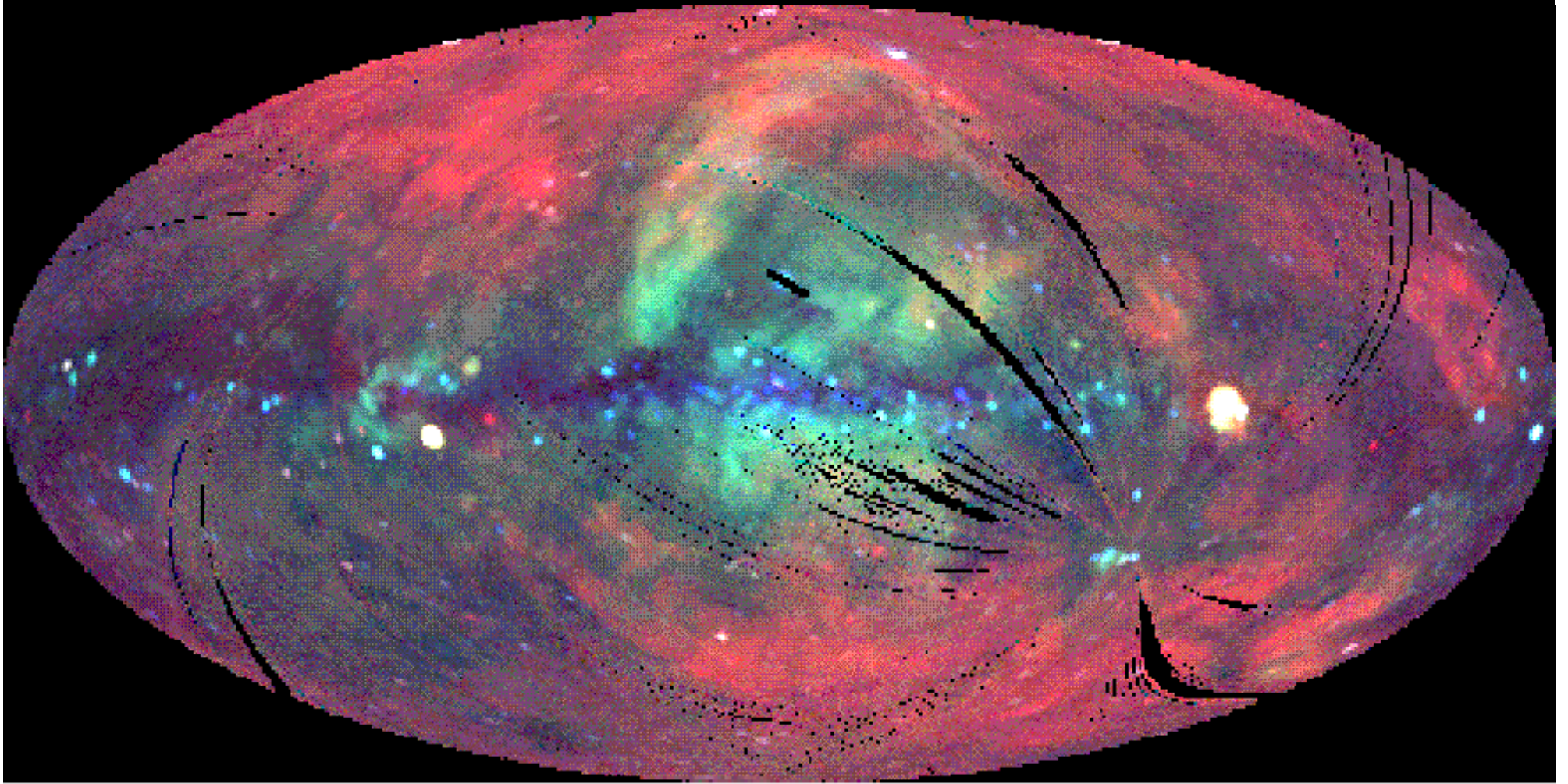


21 cm Leiden/Parkes



# le ciel: rayons-X

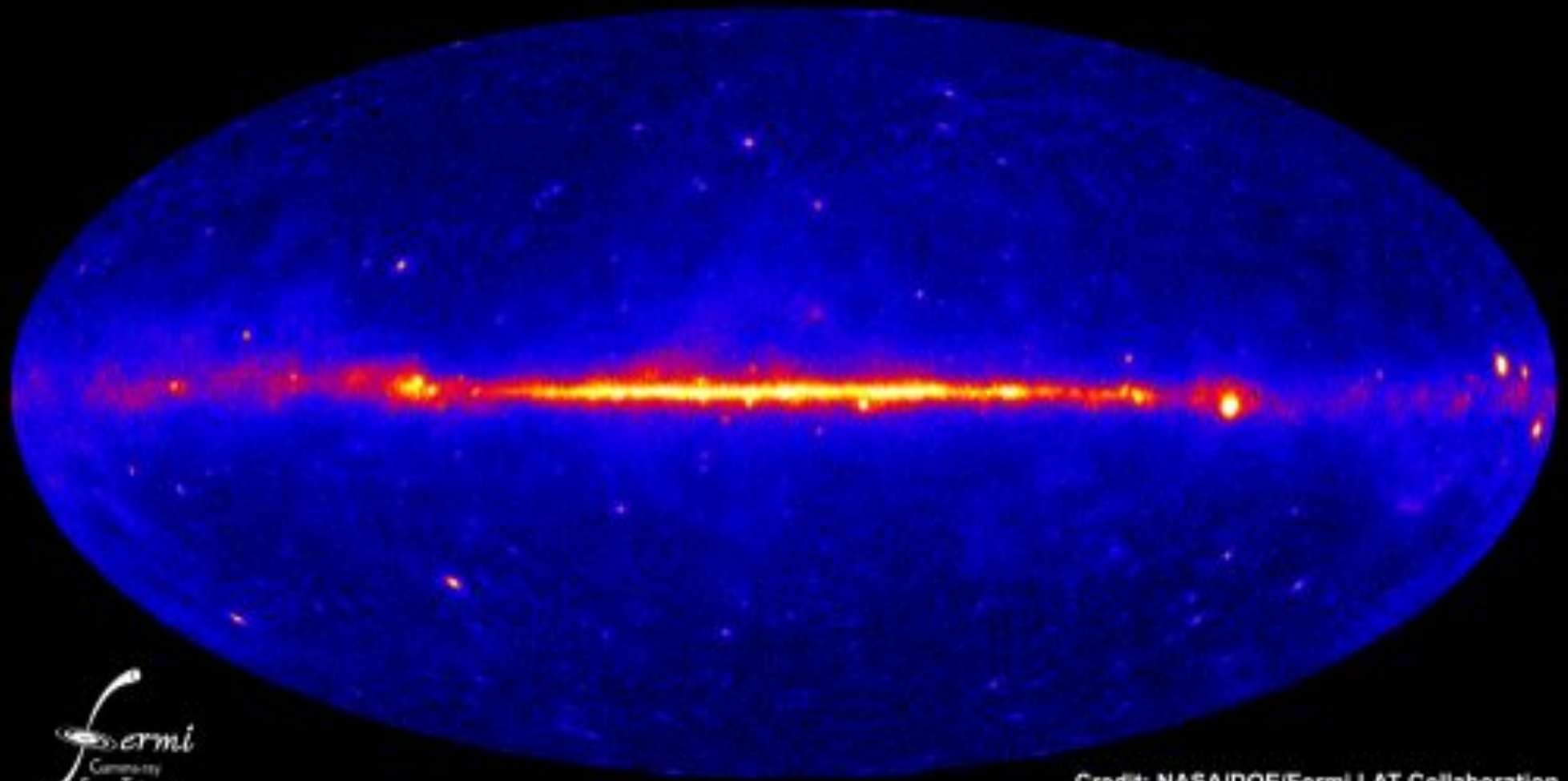
---



ROSAT

# le ciel: rayons gamma

---



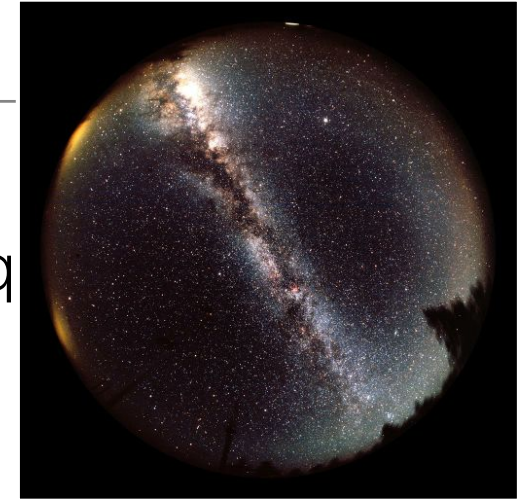
Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

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

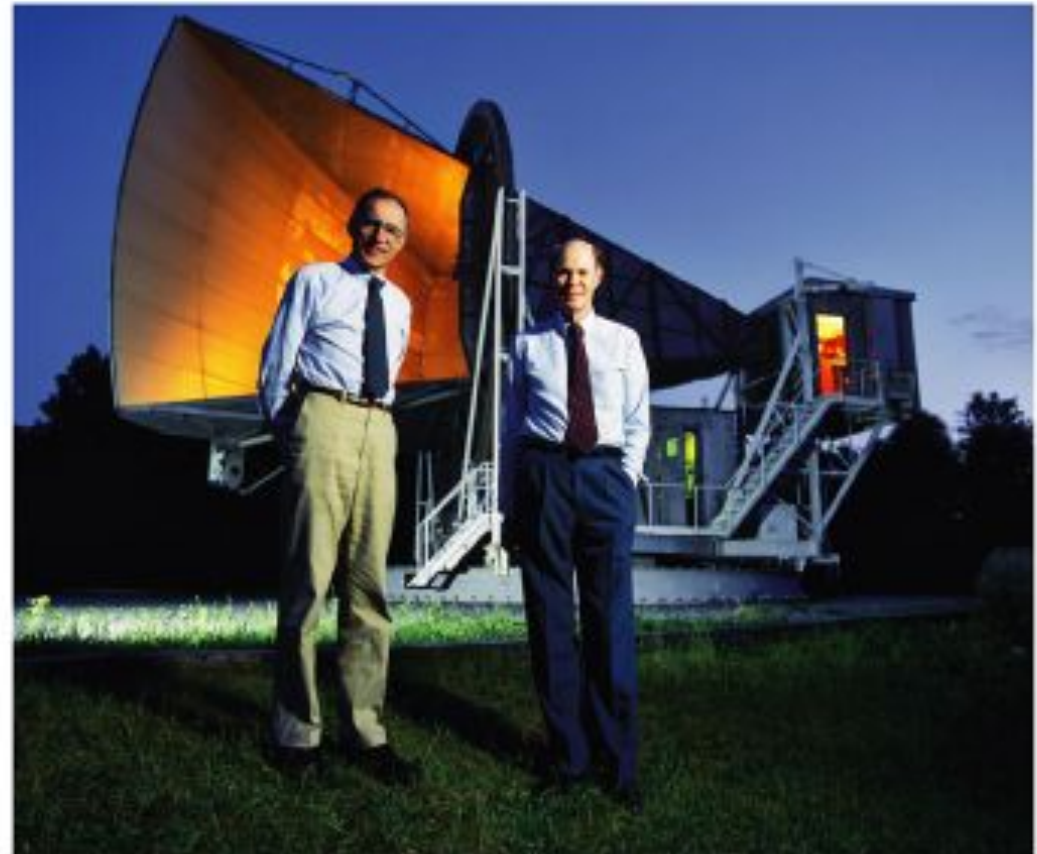
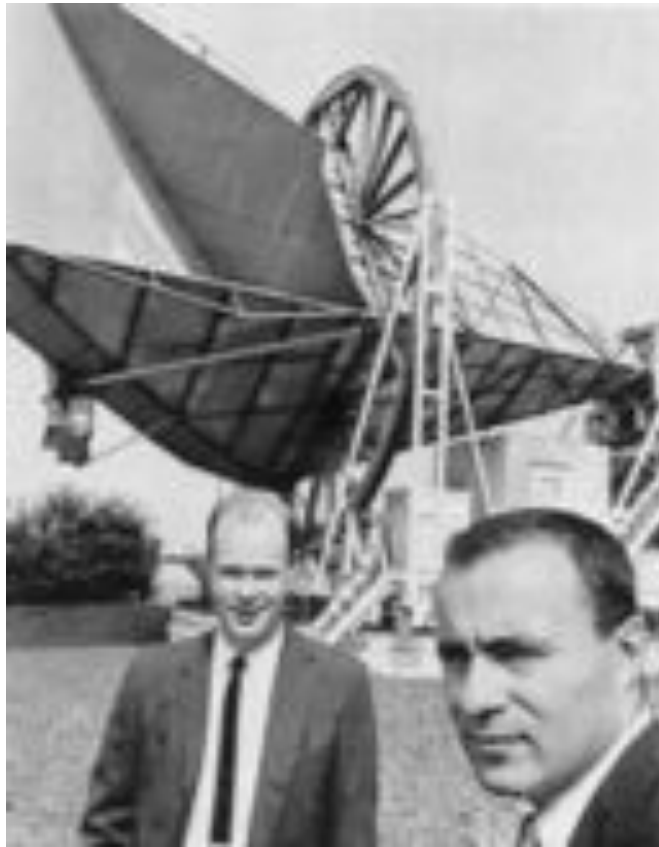


# Le fond diffus cosmologique

---

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

---



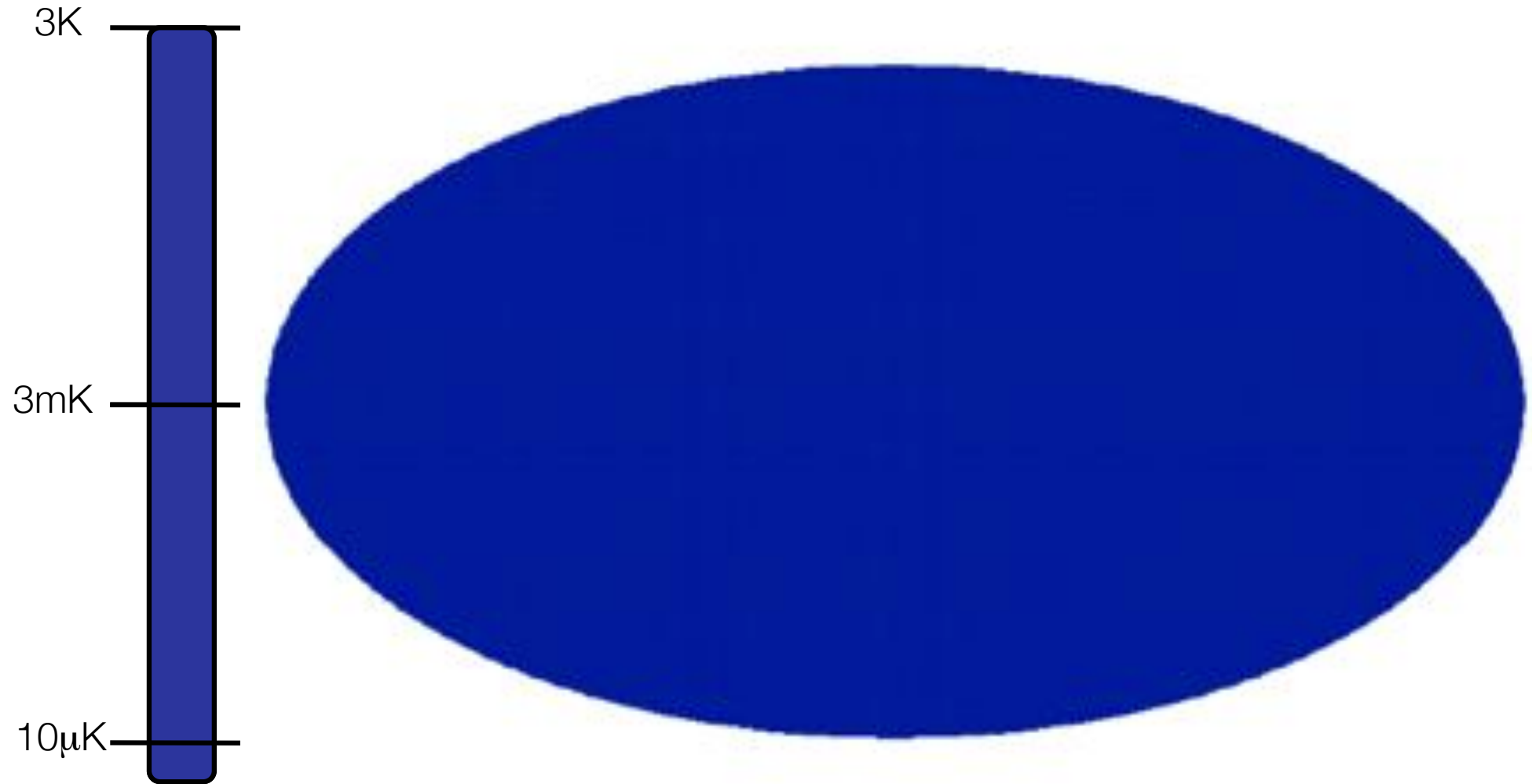
observations du **CMB (fond cosmologique)** à la Penzias & Wilson au laboratoire APC (Paris Diderot) avec Michel Piat, à 10 GHz ( $\sim 3\text{cm}$ ) avec les étudiants du Master 2 Pro OSAE (collaboration avec IAS Orsay et université Paris Sud 11)

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

photos: H. Dole

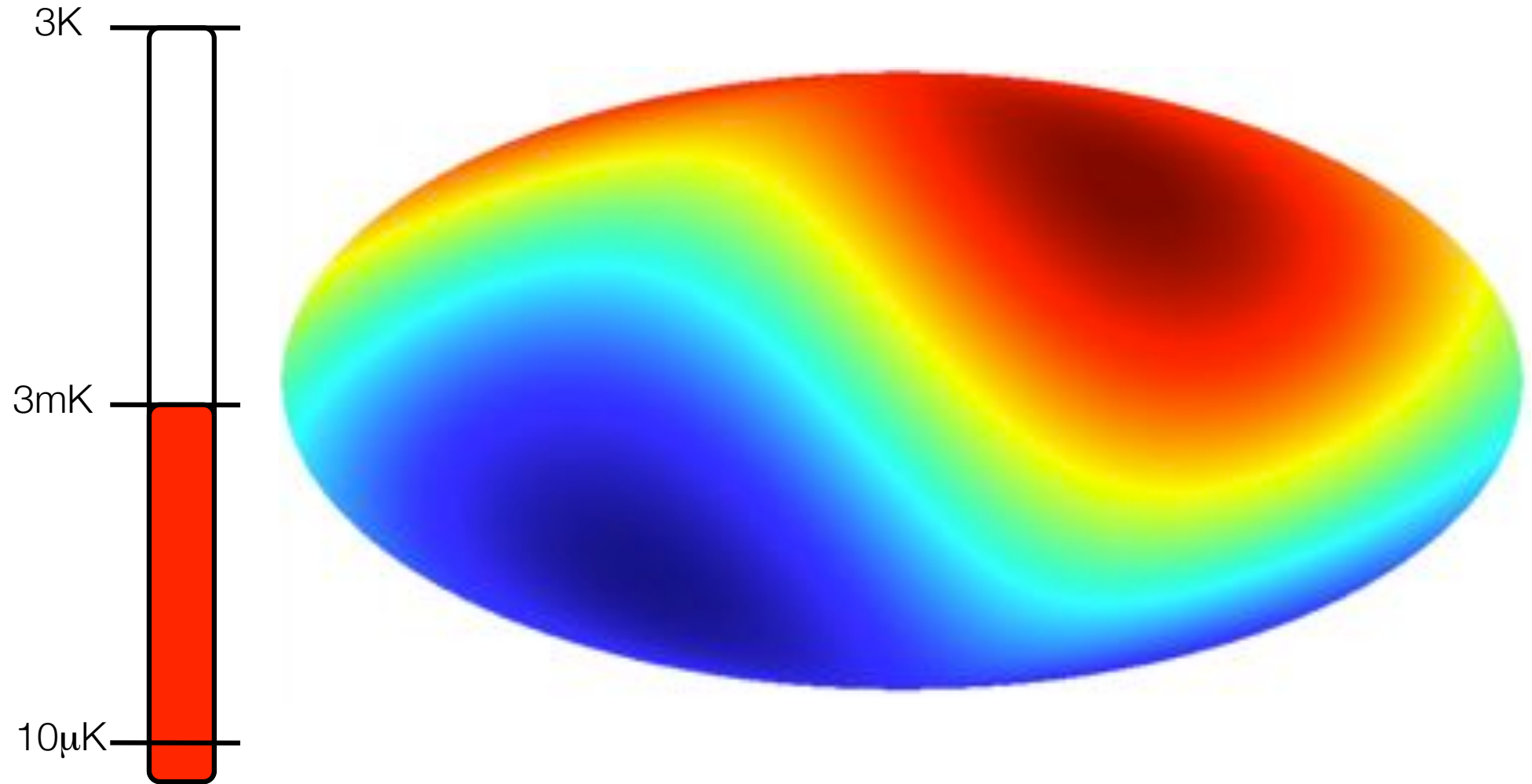
# fond diffus cosmologique: monopôle

---



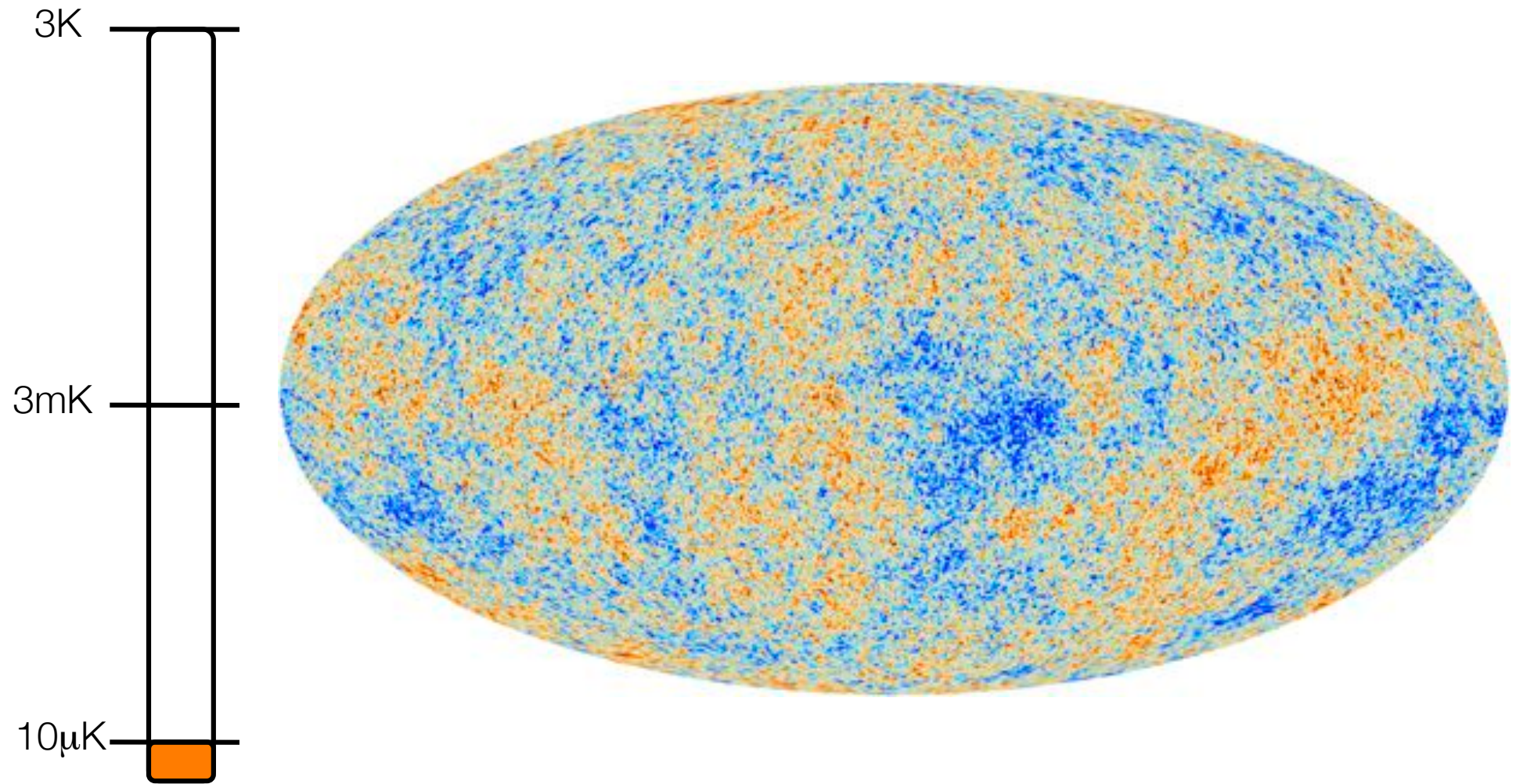
# fond diffus cosmologique: dipôle

---



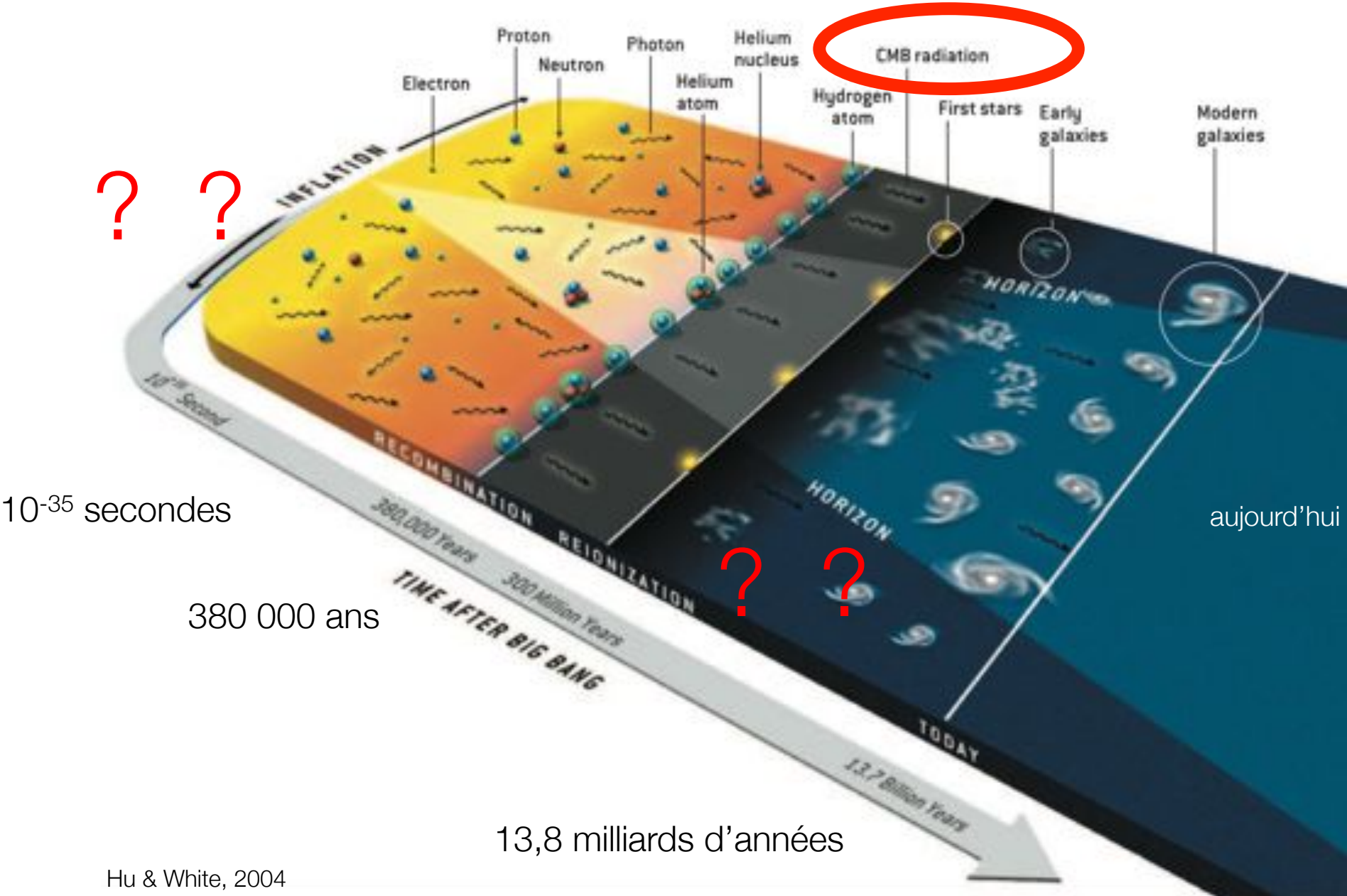
# fond diffus cosmologique: fluctuations

---



Planck 2013

# petite histoire de l'Univers



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**.

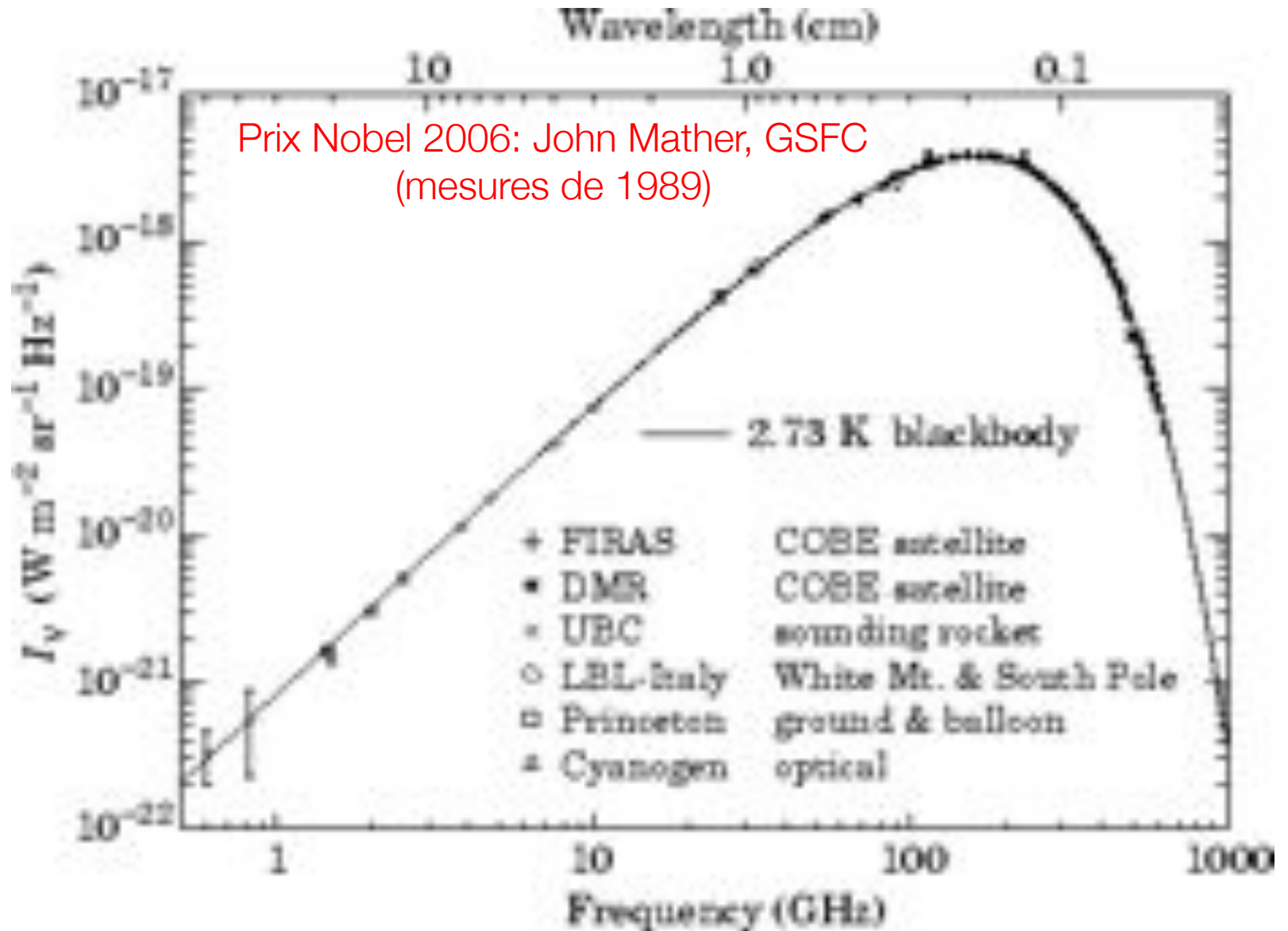
Exemples de prédictions réussies:

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

# propriétés du fond diffus cosmologique

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

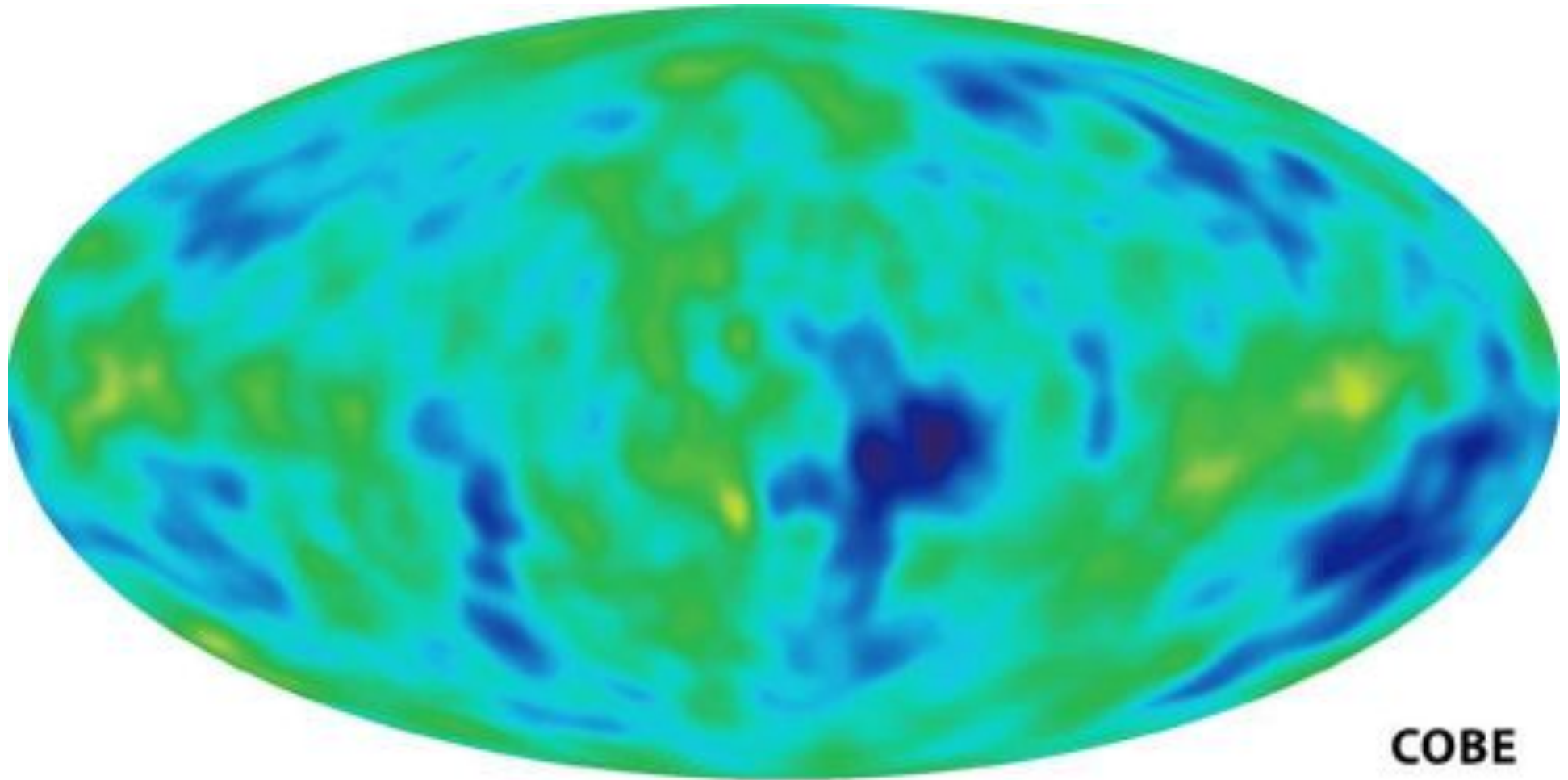
L'Univers est  
rempli de  
rayonnement:  
**la nuit n'est  
pas noire,**  
mais brillante  
en radio.



# fluctuations de température

---

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

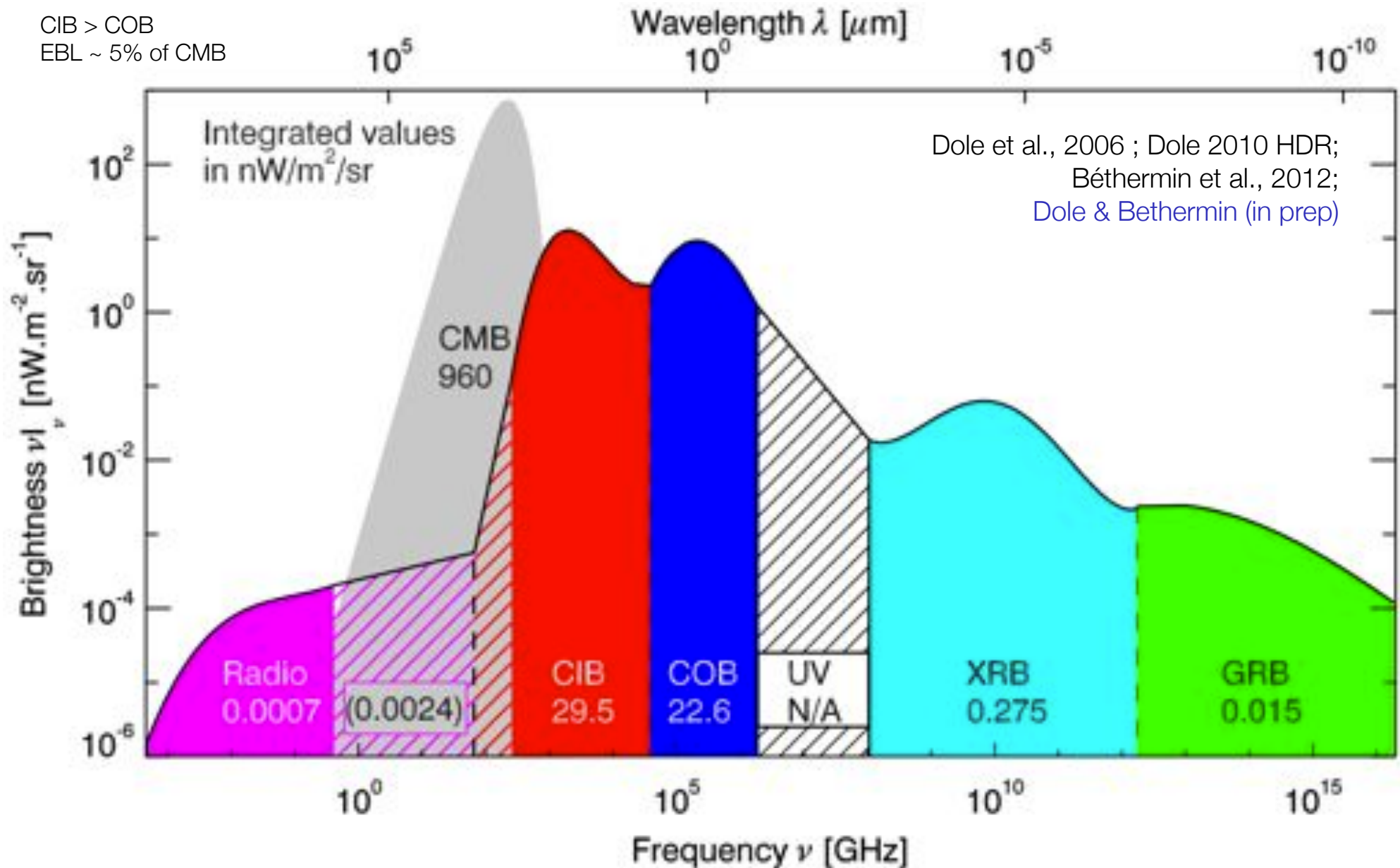


Prix Nobel 2006: George Smoot, Berkeley  
(mesures de 1992)



# le spectre de l'Univers : nuit pas noire !

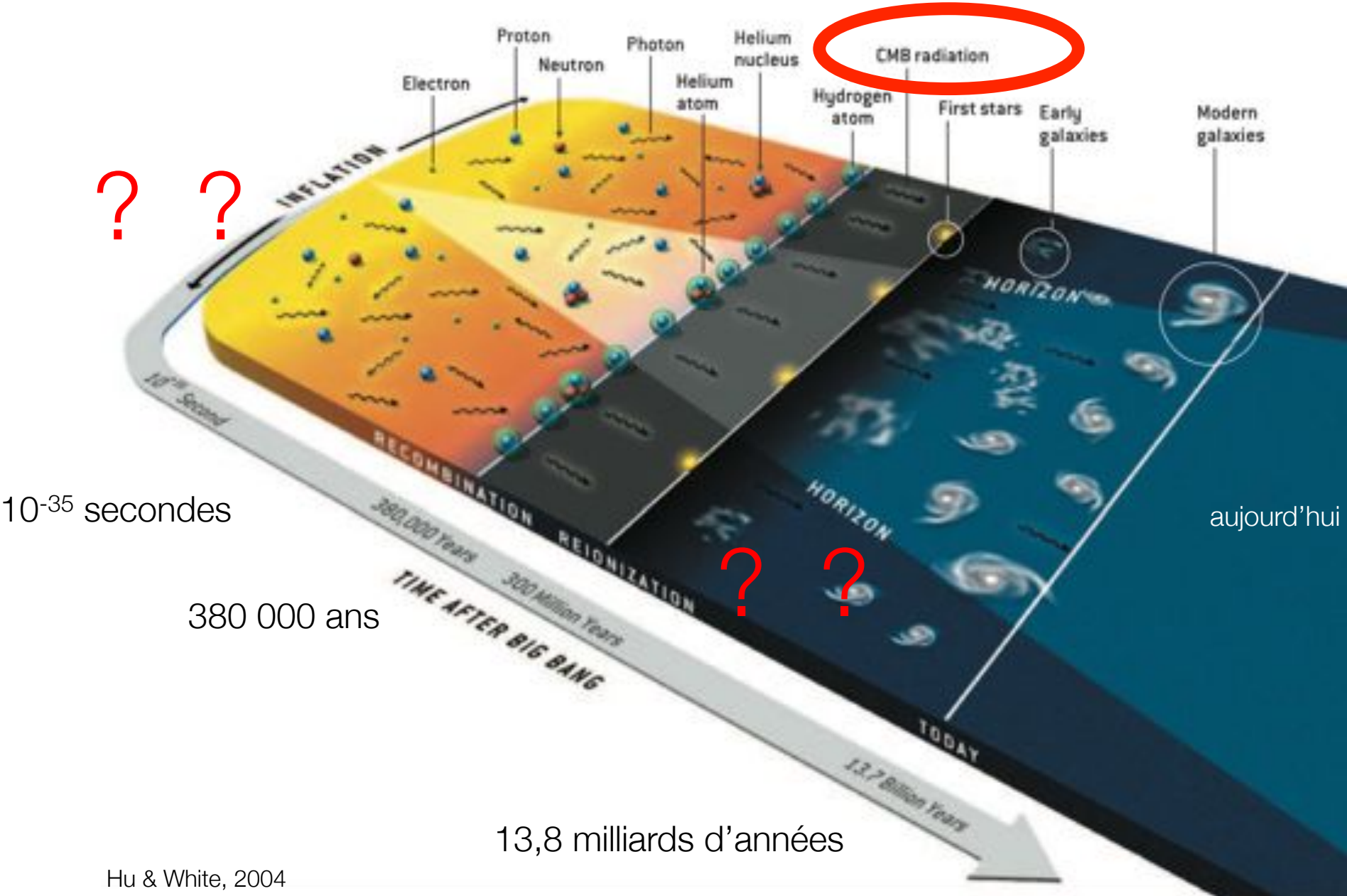
CIB > COB  
EBL ~ 5% of CMB



---

## 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

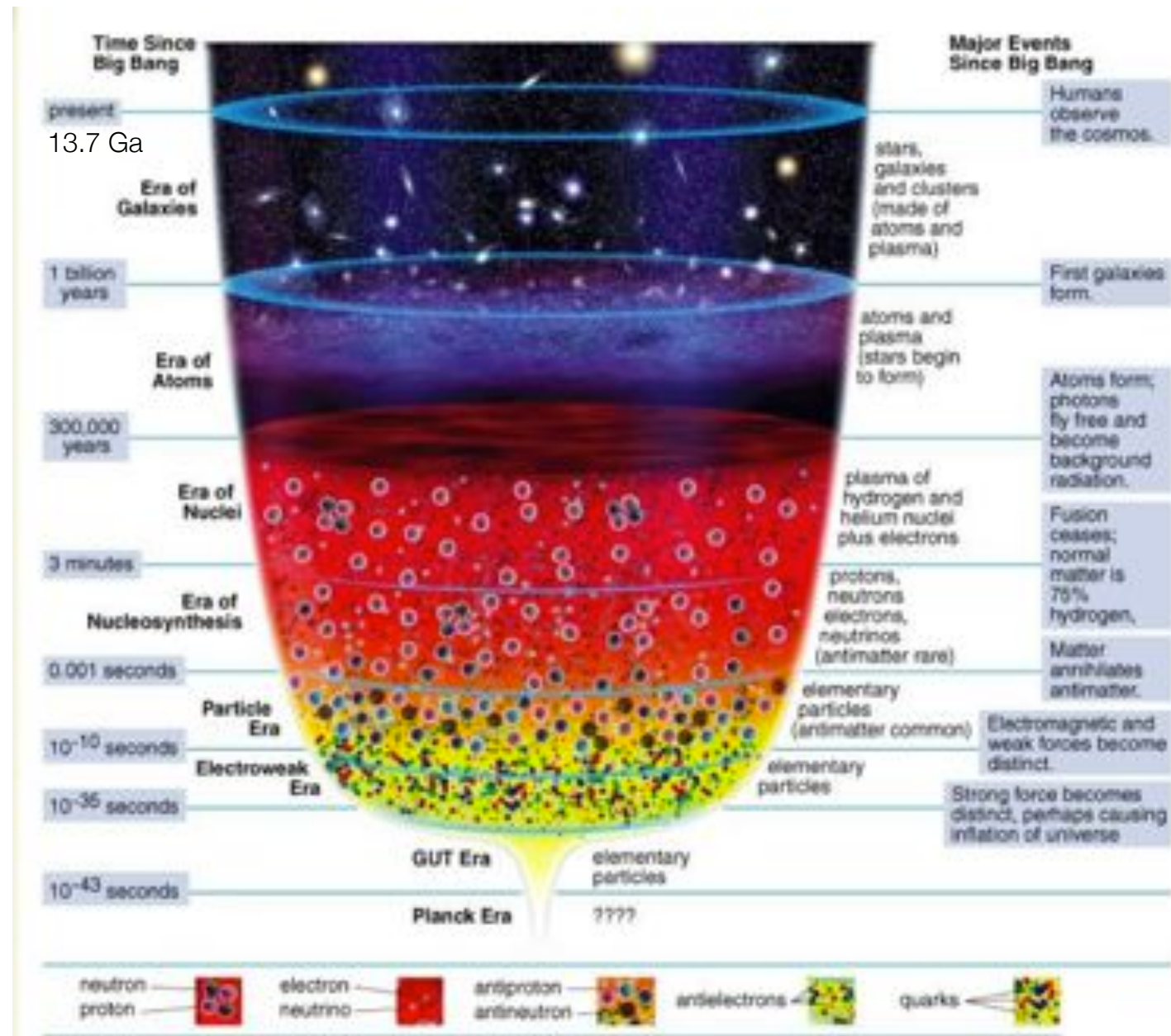
300 000 ans: l'Univers devient transparent

300 millions d'années pour former les premières étoiles

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

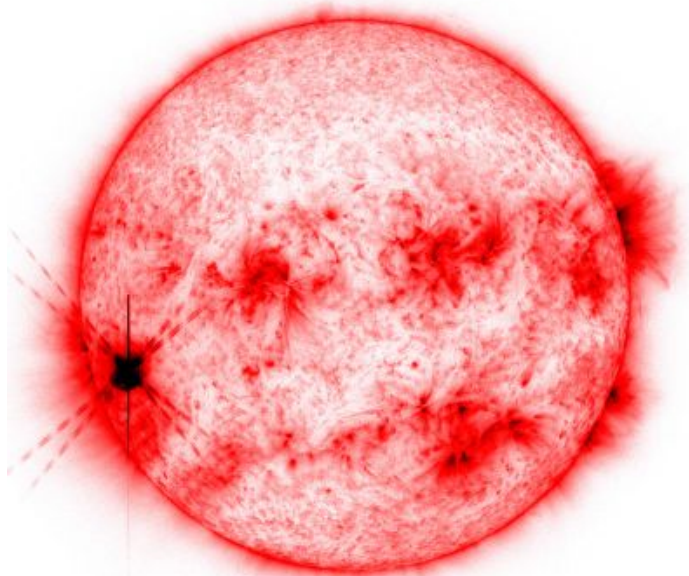
10 milliards d'années: notre Système Solaire se forme

13.8 milliards d'années: aujourd'hui

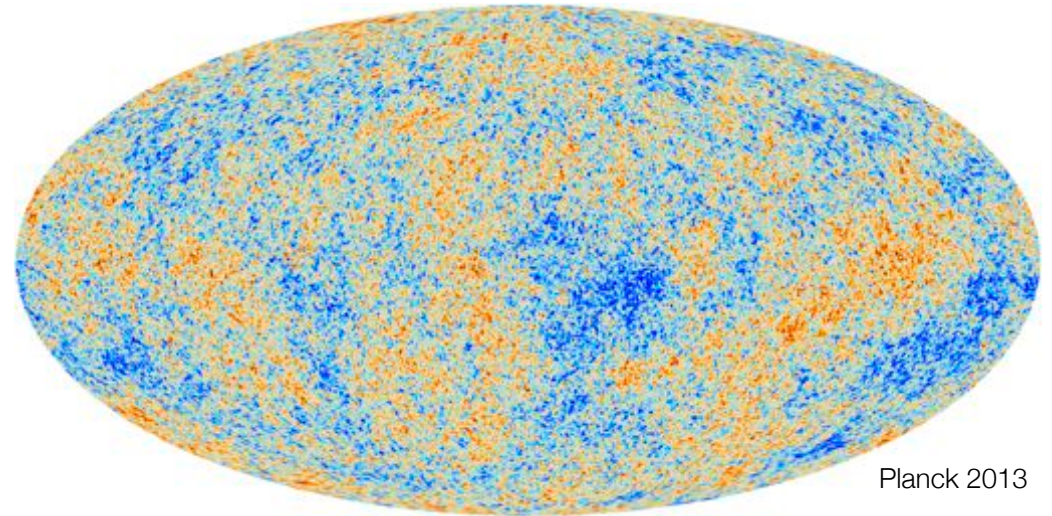


# une seule physique – multitude de conditions

---



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).

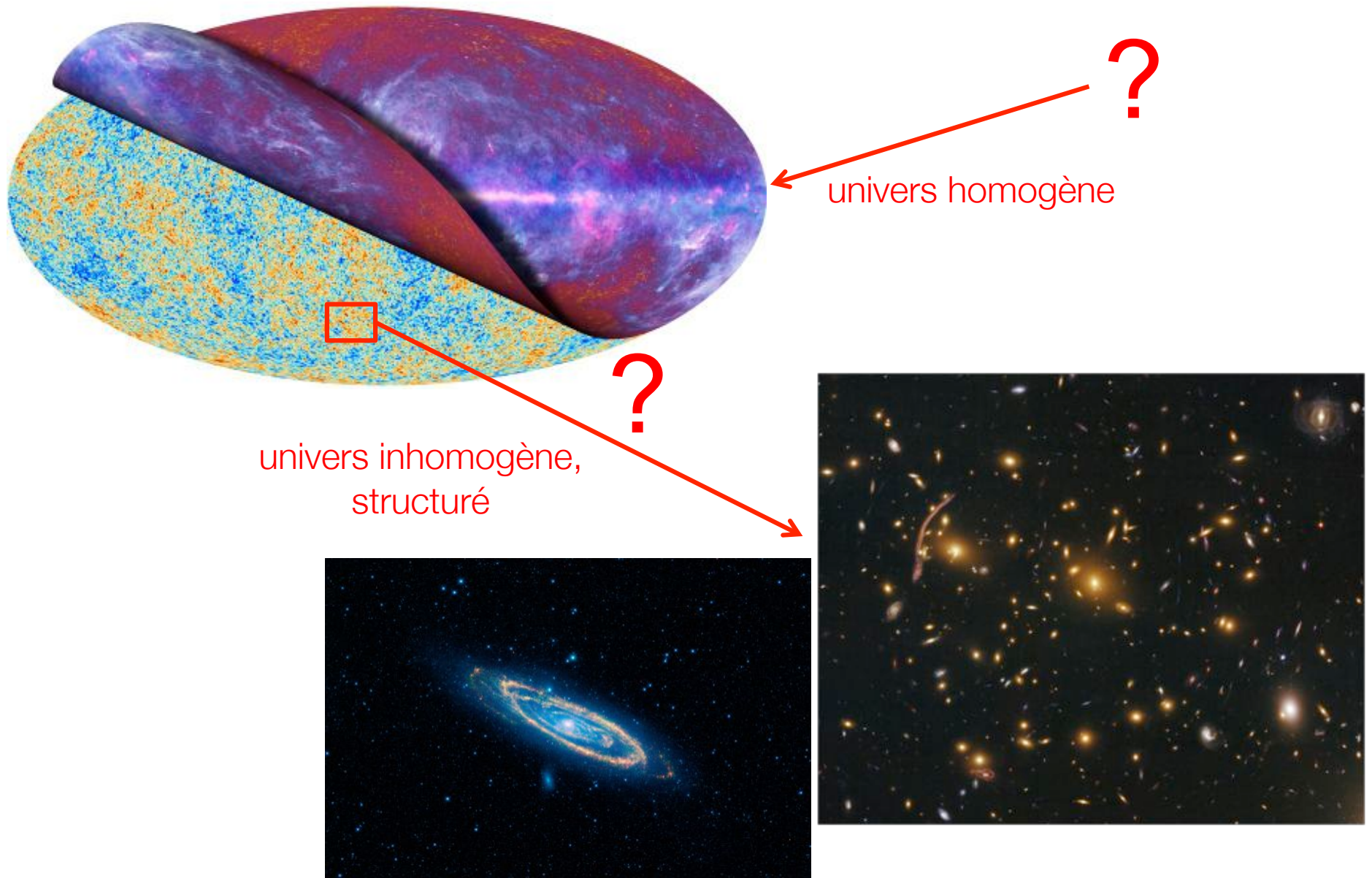
échelles spatiales et temporelles cependant très différentes.

---

## 6. les deux grandes questions en cosmologie

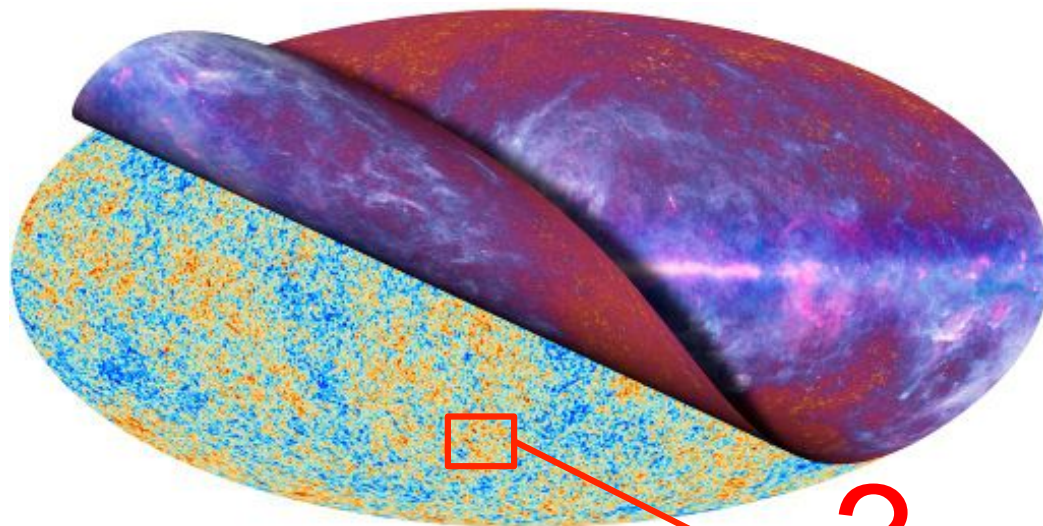
# les deux grandes questions

---



# les deux grandes questions

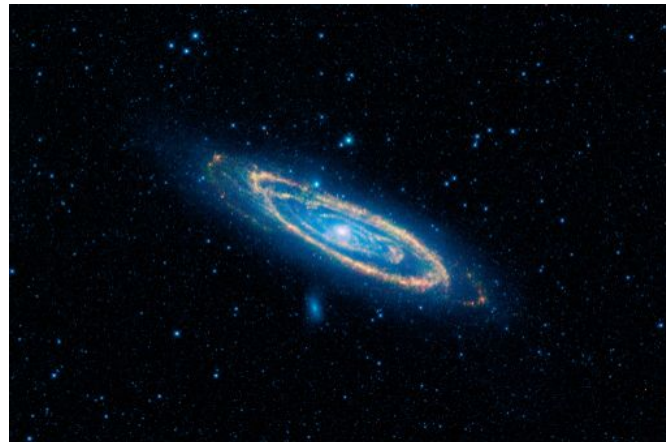
---



?  
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  $\Lambda$ CDM

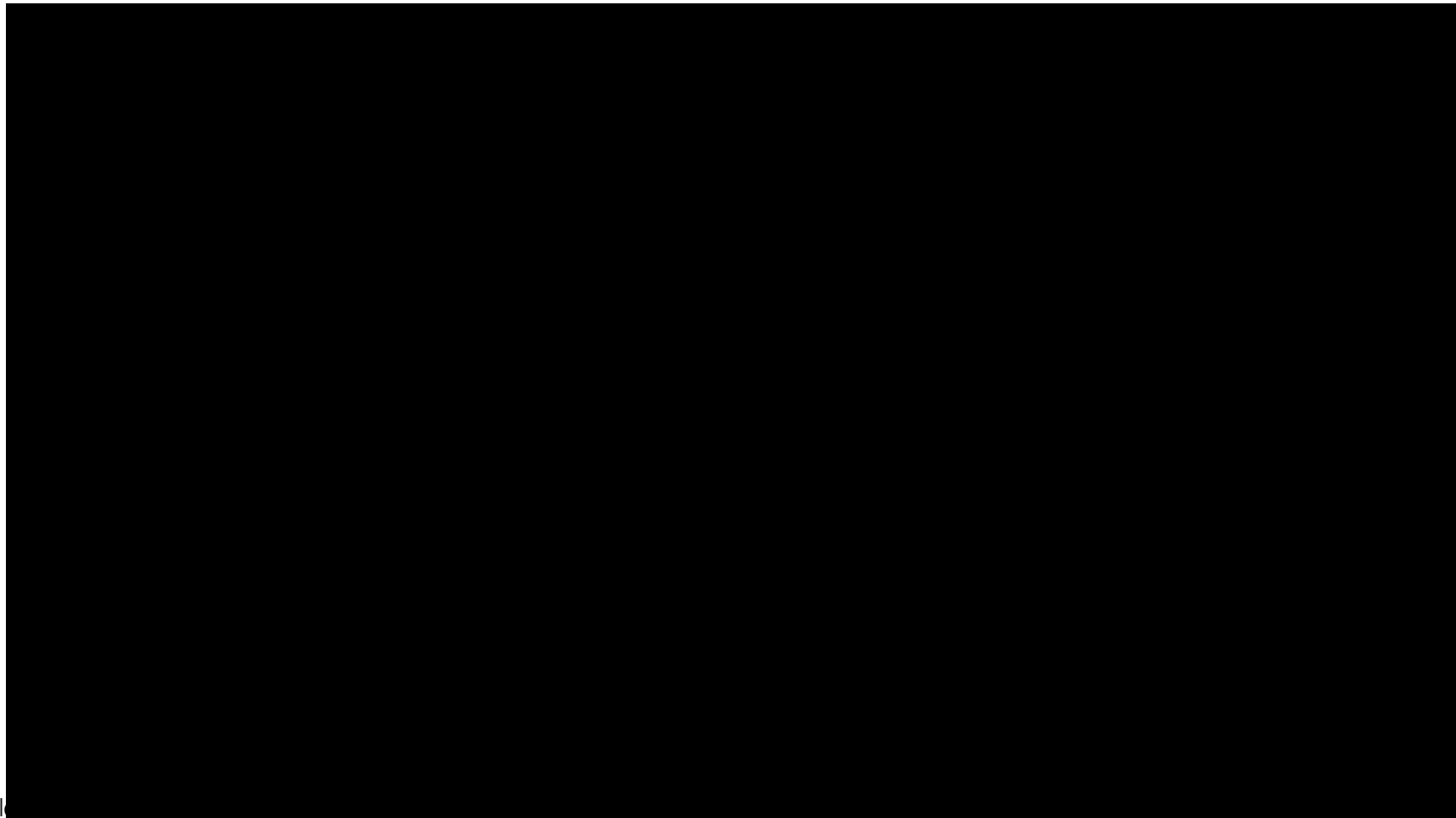
7.6 l'inflation à portée de main

7.7 la matière noire se révèle

# 7.1 Planck en bref

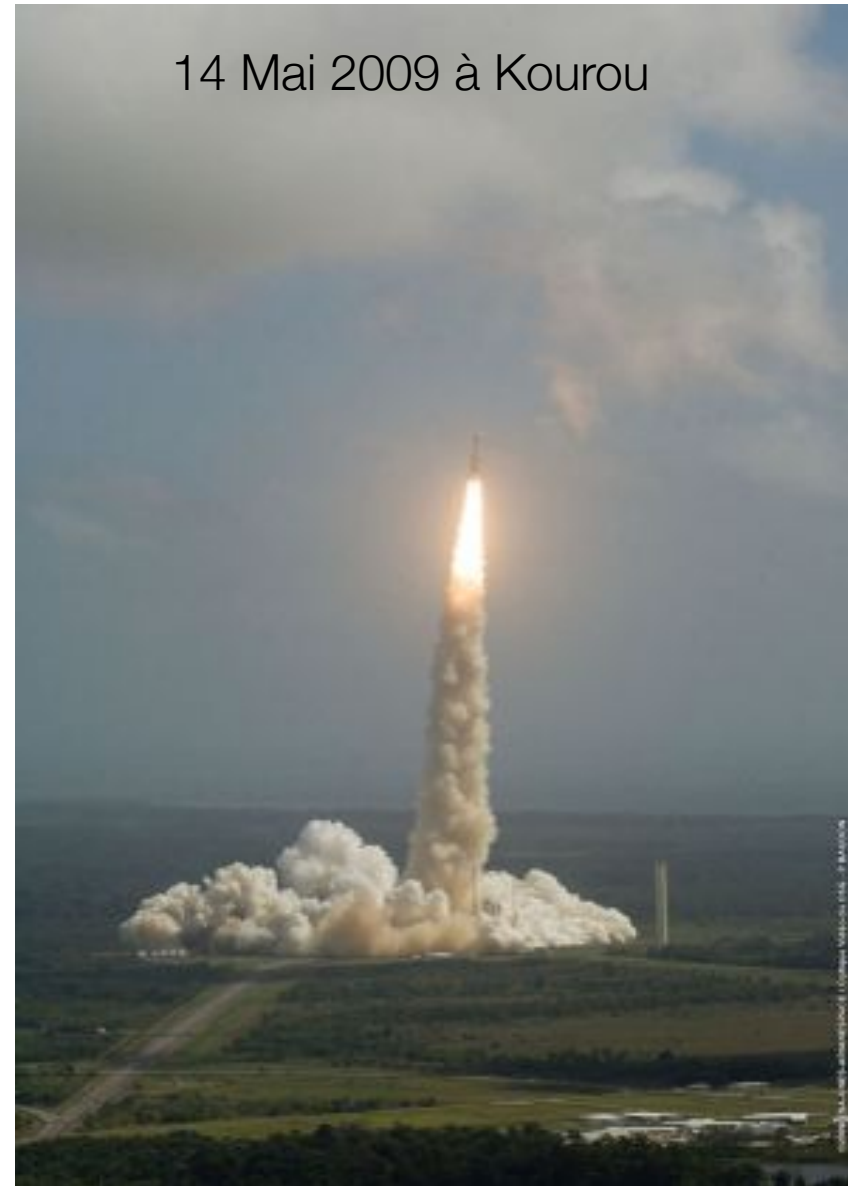
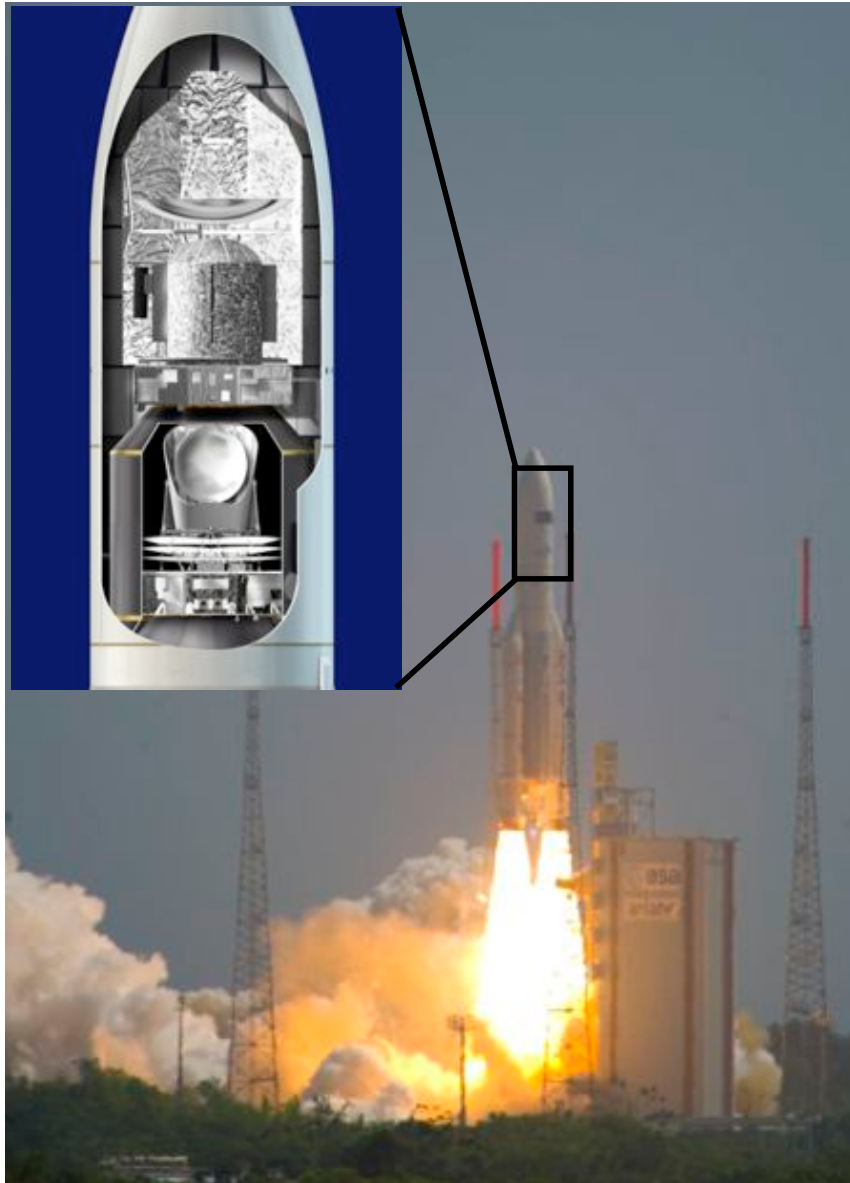
---

- 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



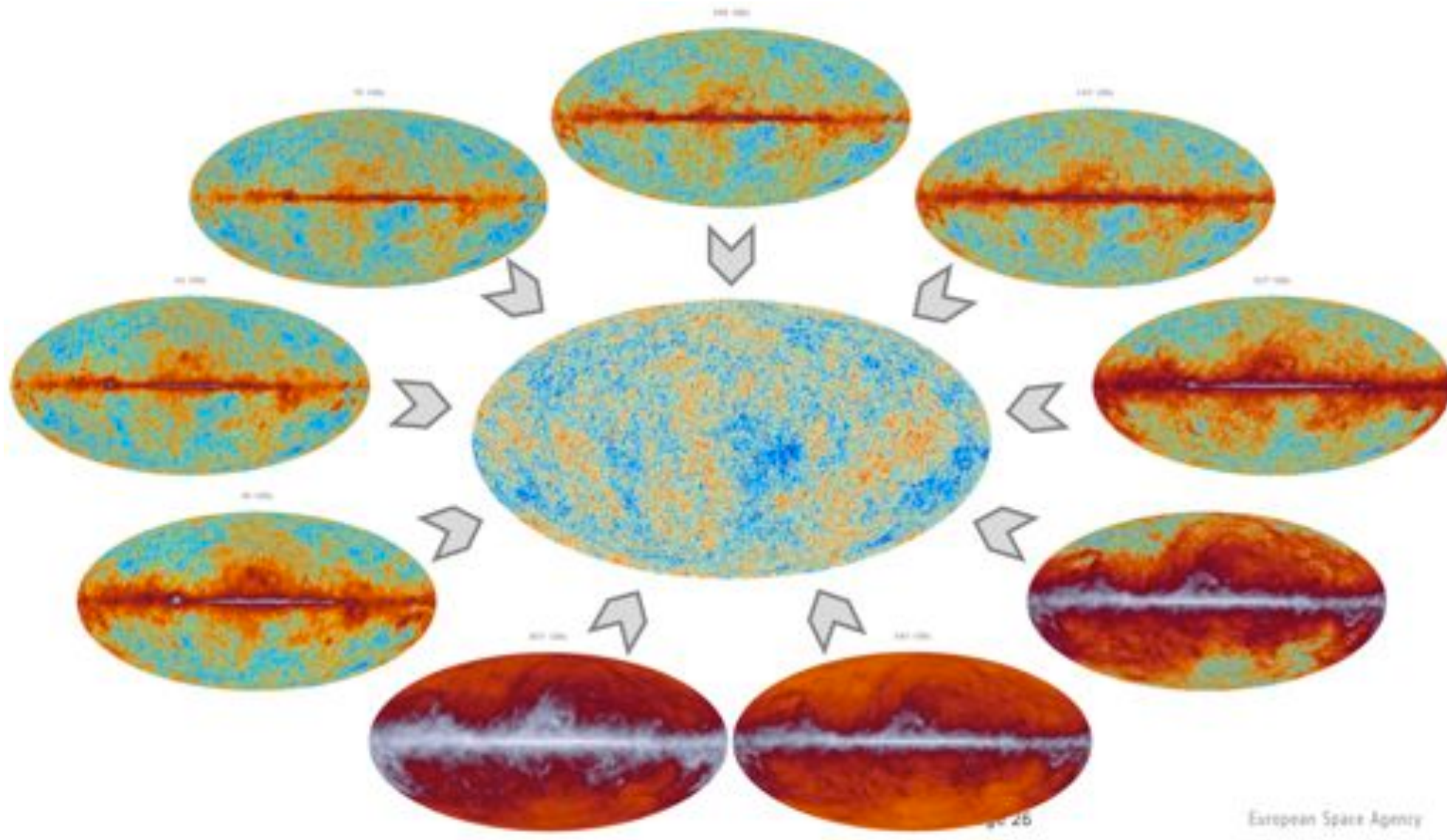
# lancement de Planck & Herschel

---



## 7.2 séparation des émissions du ciel

---

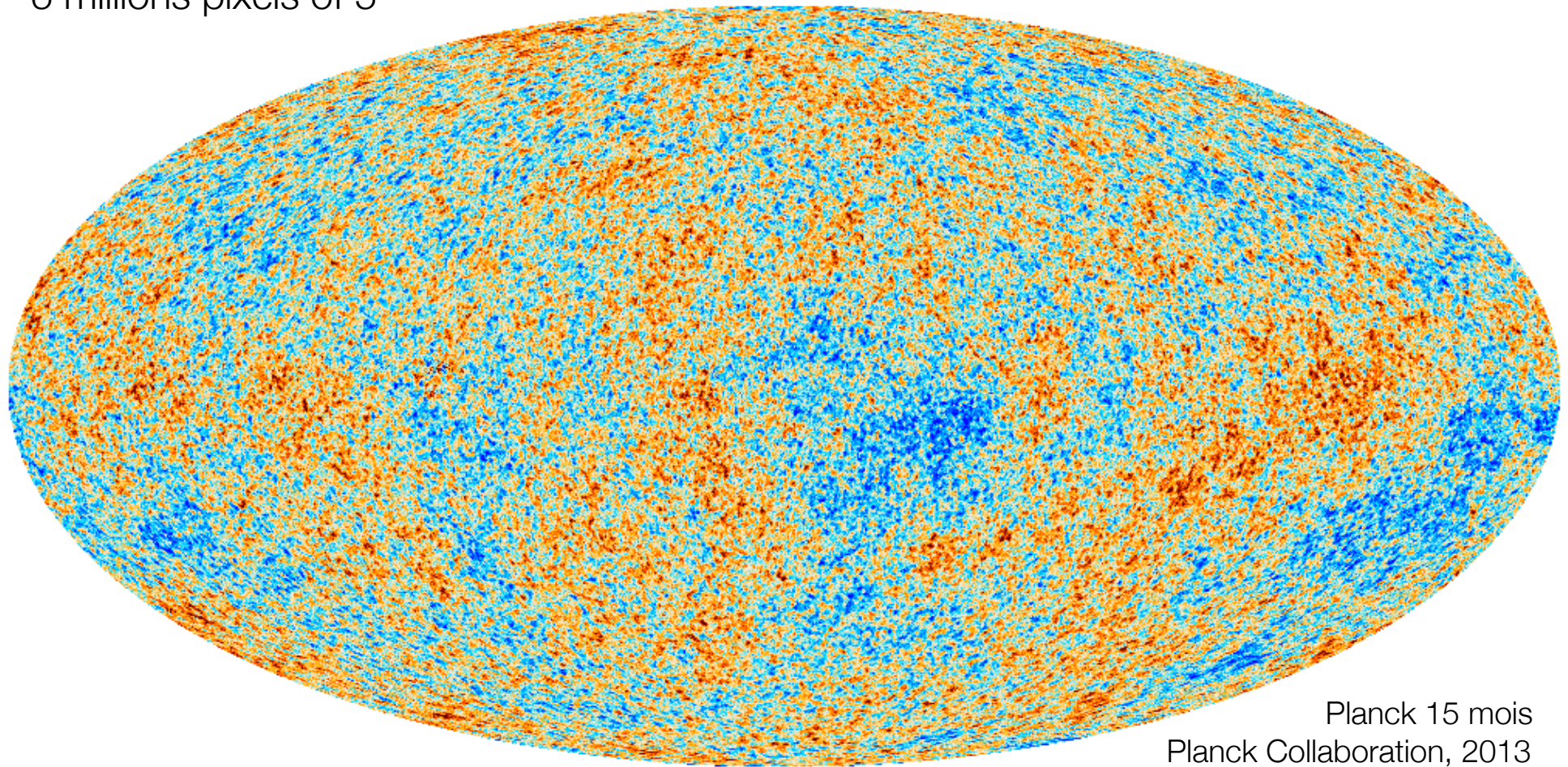


# anisotropies de temperature du fond cosm.

---

LE RAYONNEMENT FOSSILE par PLANCK

6 millions pixels of 5'



... et une certaine couverture médiatique



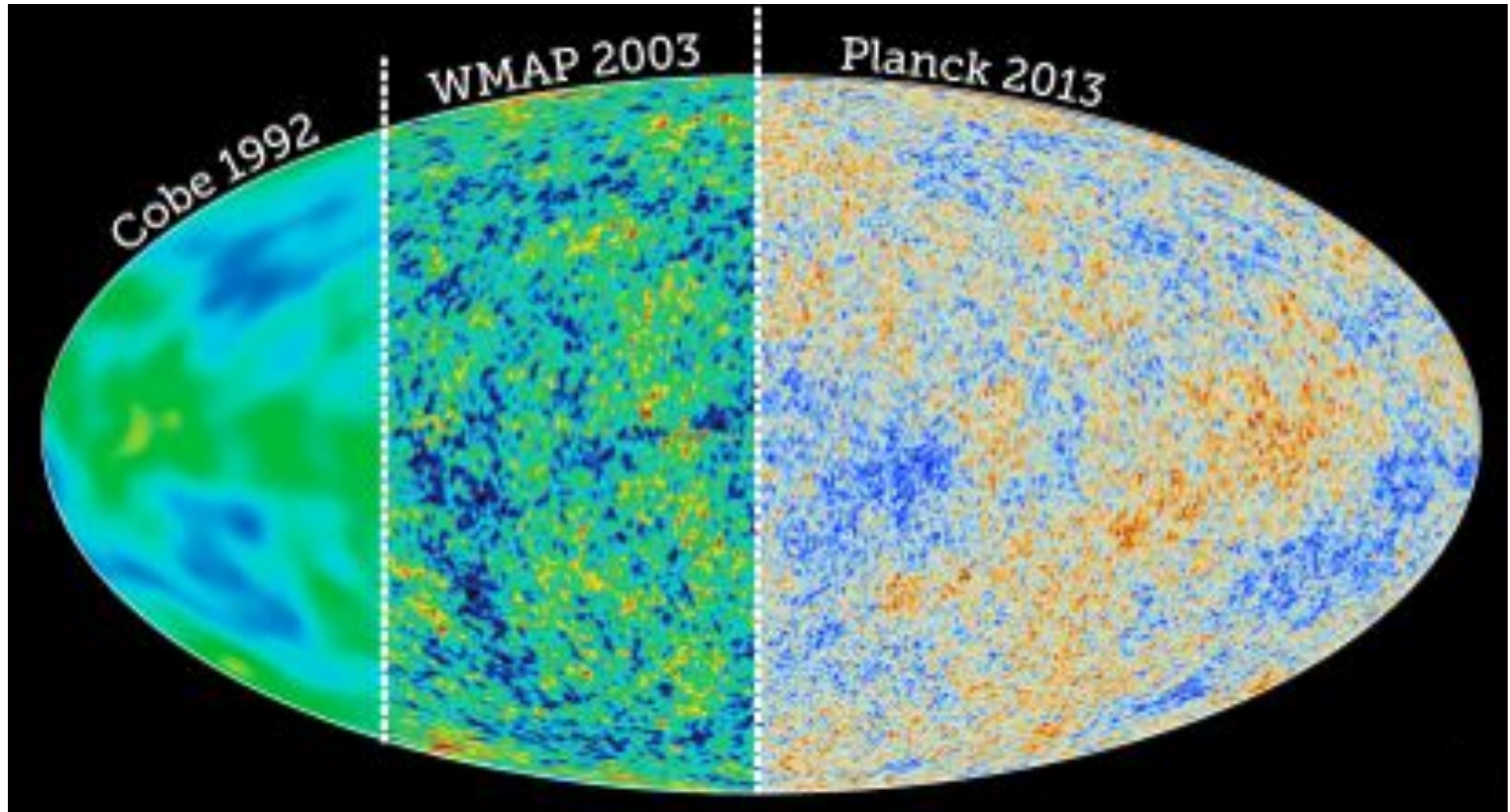
March 21st or 22nd, 2013

La mappemonde de l'Univers

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

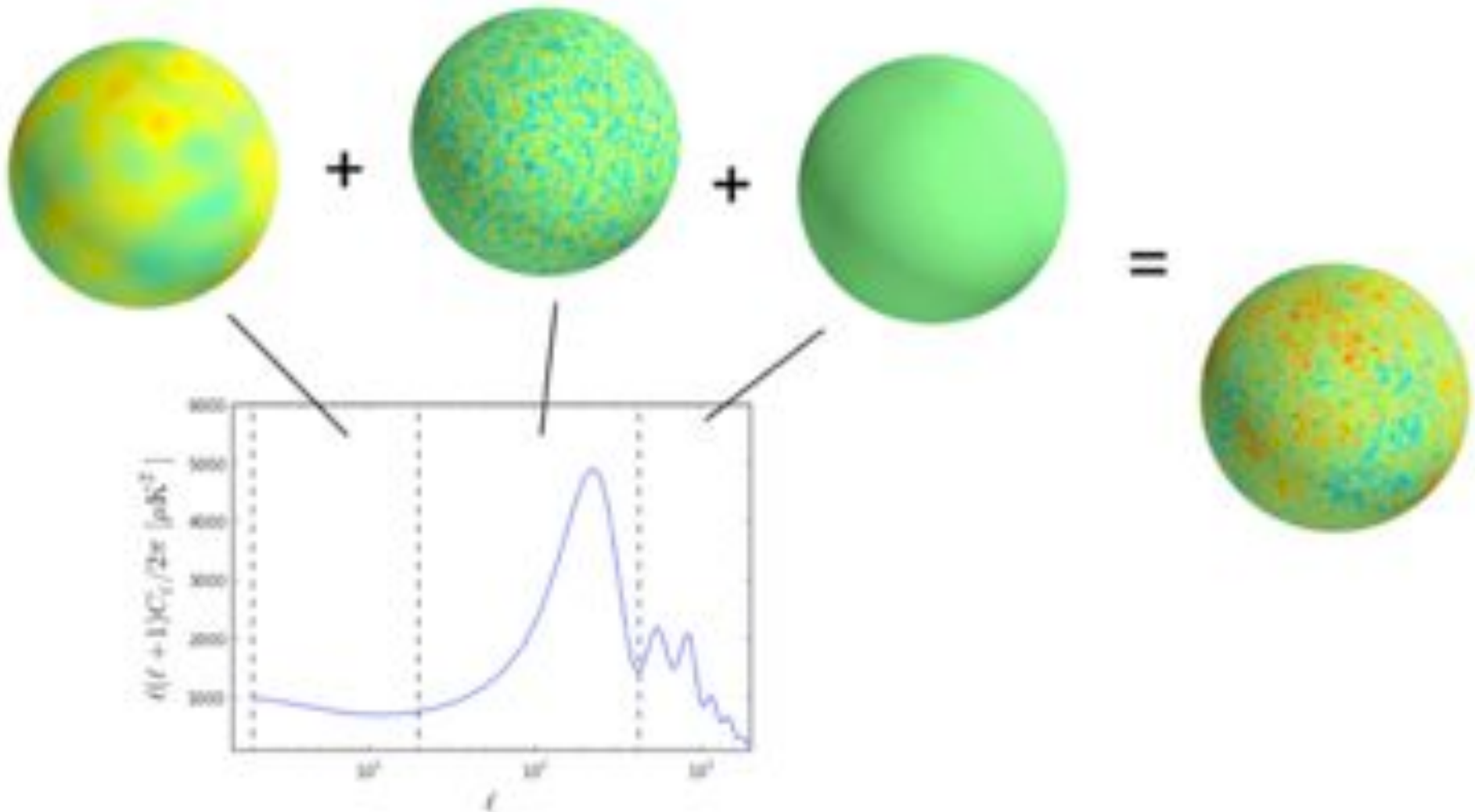
## 7.3 améliorations avec le temps et technologie

---



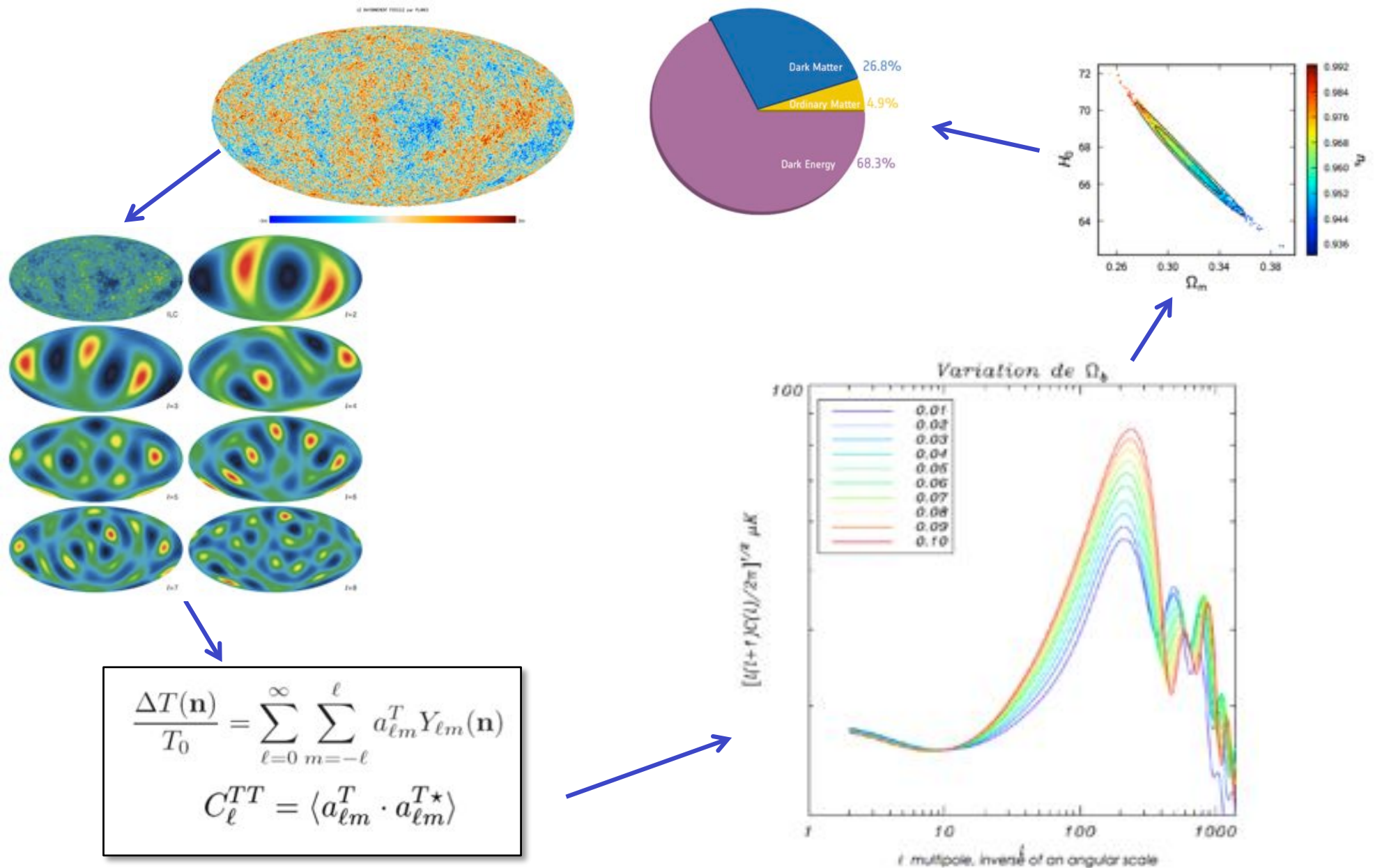
# 7.4 comment mesure t-on notre Univers ?

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

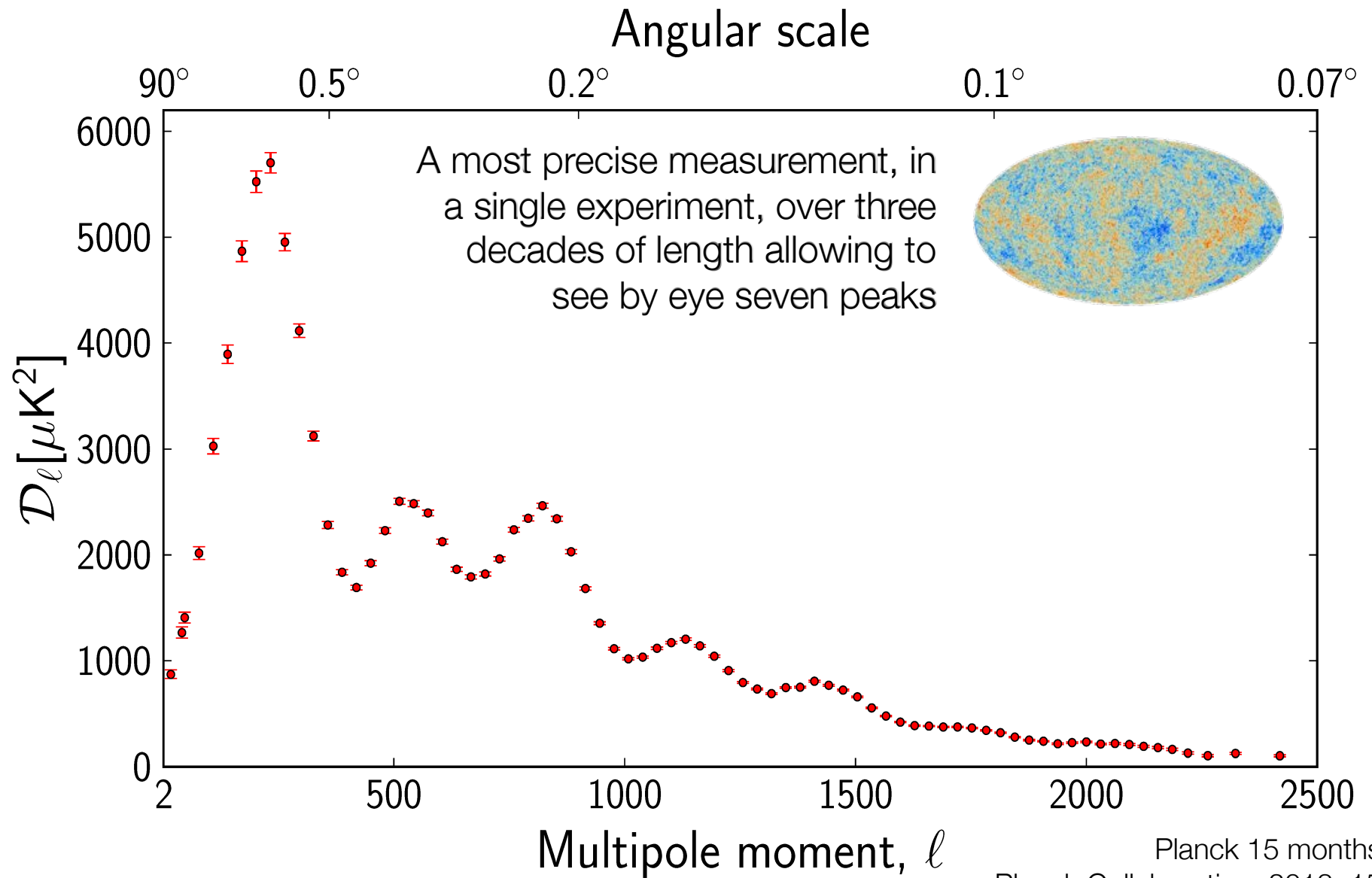




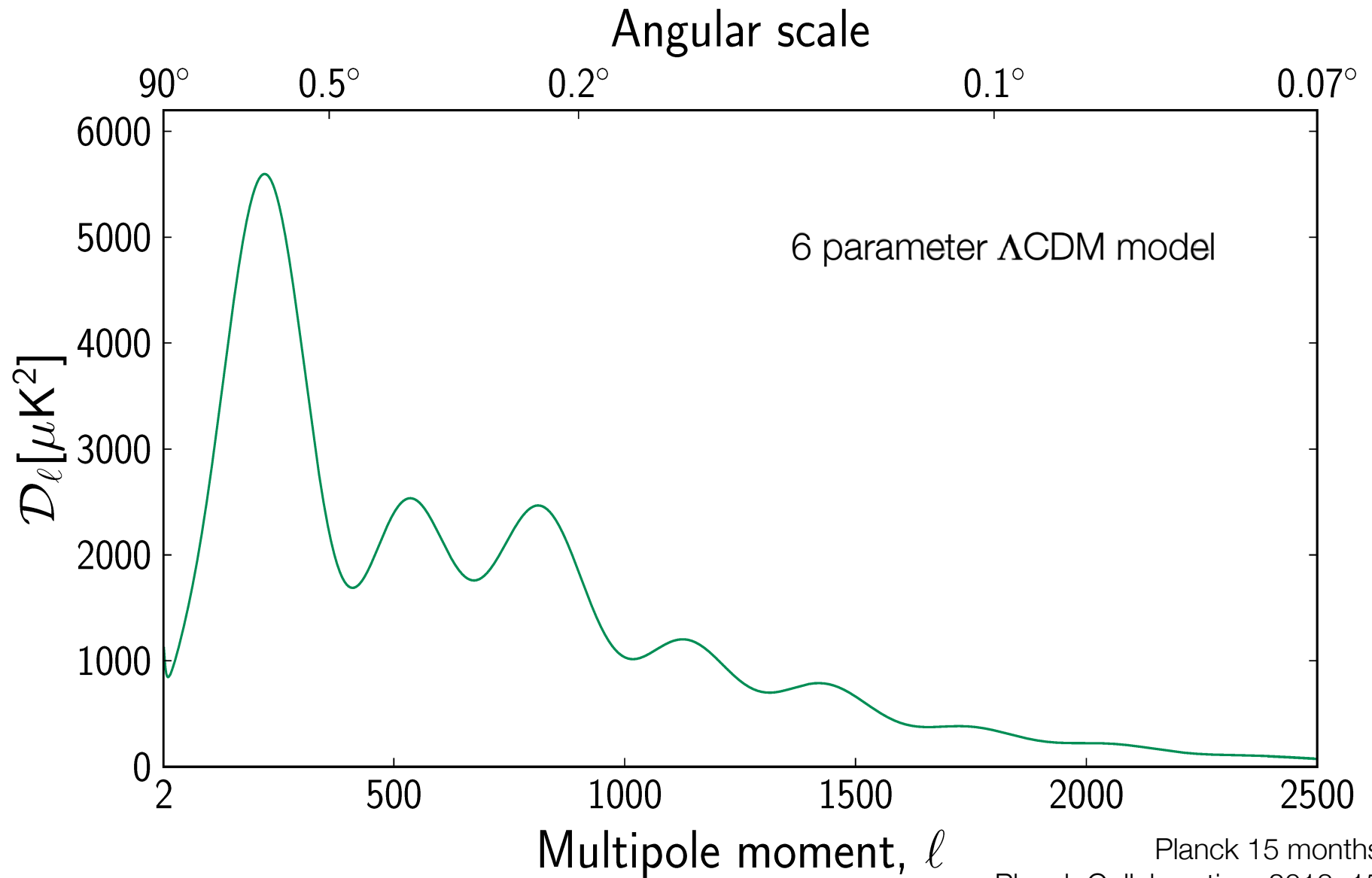
# des images aux paramètres cosmologiques



# the Planck spectrum of temperature anisotropies

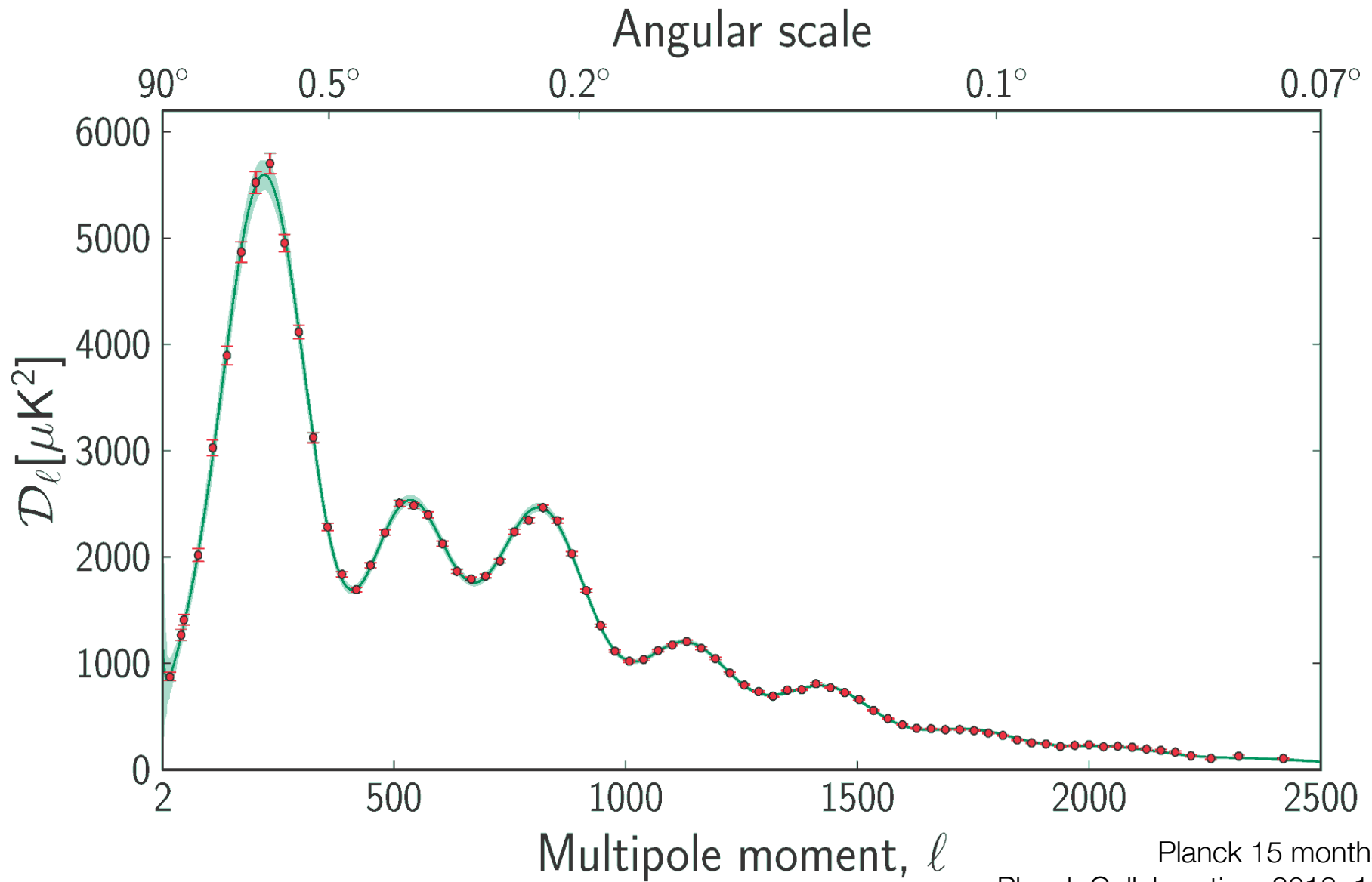


# Planck best fitting theoretical model



Planck 15 months  
Planck Collaboration, 2013, 15

# theory confronts data – 1



# 7.5 le modèle standard $\Lambda$ -CDM

Univers plat, avec constante cosmologique et matière noire froide

Seulement 6 paramètres.....

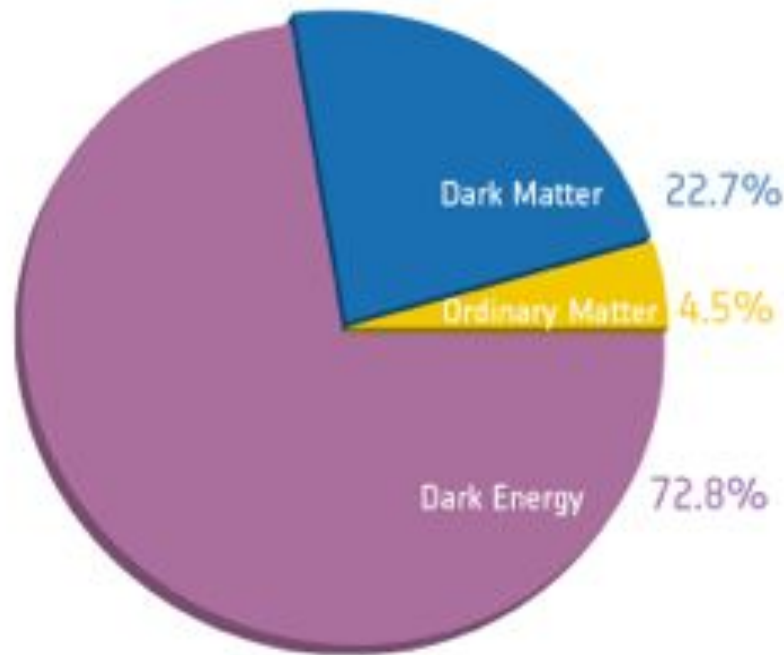
	Parameter	Best fit	68% limits
Quantité d'atomes	$\Omega_b h^2$ . . . . .	0.022068	$0.02207 \pm 0.00033$
Quantité de matière noire	$\Omega_c h^2$ . . . . .	0.12029	$0.1196 \pm 0.0031$
Lié à la distance que parcourt le son	$100\theta_{MC}$ . . . . .	1.04122	$1.04132 \pm 0.00068$
Fraction de diffusion récente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

Et quelques paramètres dérivés

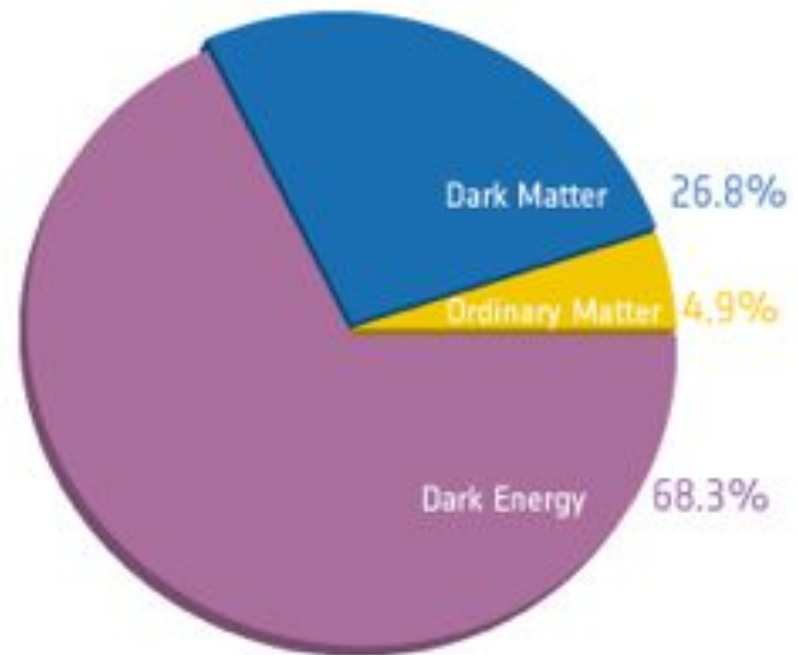
$H_0$ . . . . .	67.11	$67.4 \pm 1.4$
$\Omega_\Lambda$ . . . . .	0.6825	$0.686 \pm 0.020$
$\Omega_m$ . . . . .	0.3175	$0.314 \pm 0.020$

# 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	$0.02205 \pm 0.00028$	0.022069	$0.02207 \pm 0.00027$	0.022199	$0.02218 \pm 0.00026$	0.022161	$0.02214 \pm 0.00024$
$\Omega_c h^2$	0.12038	$0.1199 \pm 0.0027$	0.12025	$0.1198 \pm 0.0026$	0.11847	$0.1186 \pm 0.0022$	0.11889	$0.1187 \pm 0.0017$
$100\theta_{MC}$	1.04119	$1.04131 \pm 0.00063$	1.04130	$1.04132 \pm 0.00063$	1.04146	$1.04144 \pm 0.00061$	1.04148	$1.04147 \pm 0.00056$
$\tau$	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	$0.092 \pm 0.013$
$n_s$	0.9619	$0.9603 \pm 0.0073$	0.9582	$0.9585 \pm 0.0070$	0.9624	$0.9614 \pm 0.0063$	0.9611	$0.9608 \pm 0.0054$
$\ln(10^{10} A_s)$	3.0980	$3.089^{+0.012}_{-0.017}$	3.0959	$3.090 \pm 0.025$	3.0947	$3.087 \pm 0.024$	3.0973	$3.091 \pm 0.025$
$A_{100}^{TB}$	152	$171 \pm 60$	209	$212 \pm 50$	204	$213 \pm 50$	204	$212 \pm 50$
$A_{143}^{TB}$	63.5	$54 \pm 10$	72.6	$73 \pm 8$	72.2	$72 \pm 8$	72.2	$72 \pm 8$
$A_{217}^{TB}$	117.0	$107^{+10}_{-10}$	99.5	$99 \pm 10$	60.2	$58 \pm 10$	60.2	$58 \pm 10$
$A_{353}^{TB}$	0.0	$< 10.7$	3.57	$3.24 \pm 0.83$	3.25	$3.24 \pm 0.83$	3.25	$3.24 \pm 0.83$
$A_{545}^{TB}$	27.2	$29^{+4}_{-4}$	53.9	$49.6 \pm 5.0$	52.3	$50.0 \pm 5.0$	52.3	$50.0 \pm 5.0$
$A_{856}^{TB}$	6.80	...	5.17	$2.54^{+1.1}_{-1.2}$	4.64	$2.51^{+1.1}_{-1.2}$	4.64	$2.51^{+1.1}_{-1.2}$
$r_{lens+CB}$	0.916	$> 0.850$	0.825	$0.823^{+0.009}_{-0.017}$	0.814	$0.825 \pm 0.010$	0.814	$0.825 \pm 0.010$
$r_{lens+CB}^{CB}$	0.406	$0.42 \pm 0.22$	1.0000	$> 0.930$	1.0000	$> 0.930$	1.0000	$> 0.930$
$\gamma^{CB}$	0.601	$0.53^{+0.13}_{-0.22}$	0.674	$0.638 \pm 0.081$	0.656	$0.643 \pm 0.081$	0.656	$0.643 \pm 0.081$
$\rho^{lens+CB}$	0.03	...	0.000	$< 0.409$	0.000	$< 0.389$	0.000	$< 0.410$
$A^{lens}$	0.9	...	0.89	$5.34^{+1.1}_{-1.3}$	1.14	$4.74^{+1.1}_{-1.3}$	1.14	$5.34^{+1.1}_{-1.3}$
$\Omega_s$	0.6817	$0.685^{+0.011}_{-0.016}$	0.6830	$0.685^{+0.011}_{-0.016}$	0.6939	$0.693 \pm 0.013$	0.6934	$0.692 \pm 0.010$
$\sigma_8$	0.8347	$0.829 \pm 0.012$	0.8322	$0.828 \pm 0.012$	0.8271	$0.8233 \pm 0.0097$	0.8286	$0.826 \pm 0.012$
$\Omega_m$	11.37	$11.1 \pm 1.1$	11.38	$11.1 \pm 1.1$	11.42	$11.1 \pm 1.1$	11.52	$11.3 \pm 1.1$
$M_b$	67.04	$67.3 \pm 1.2$	67.15	$67.3 \pm 1.2$	67.94	$67.9 \pm 1.0$	67.77	$67.80 \pm 0.77$
$Age/Gyr$	13.8242	$13.817 \pm 0.048$	13.8170	$13.813 \pm 0.047$	13.7914	$13.794 \pm 0.044$	13.7965	$13.798 \pm 0.037$
$100\theta_L$	1.04136	$1.04147 \pm 0.00062$	1.04146	$1.04148 \pm 0.00062$	1.04161	$1.04159 \pm 0.00060$	1.04163	$1.04162 \pm 0.00056$
$\tau_{drag}$	147.36	$147.49 \pm 0.59$	147.35	$147.47 \pm 0.59$	147.68	$147.67 \pm 0.59$	147.611	$147.68 \pm 0.45$

km/s/Mpc

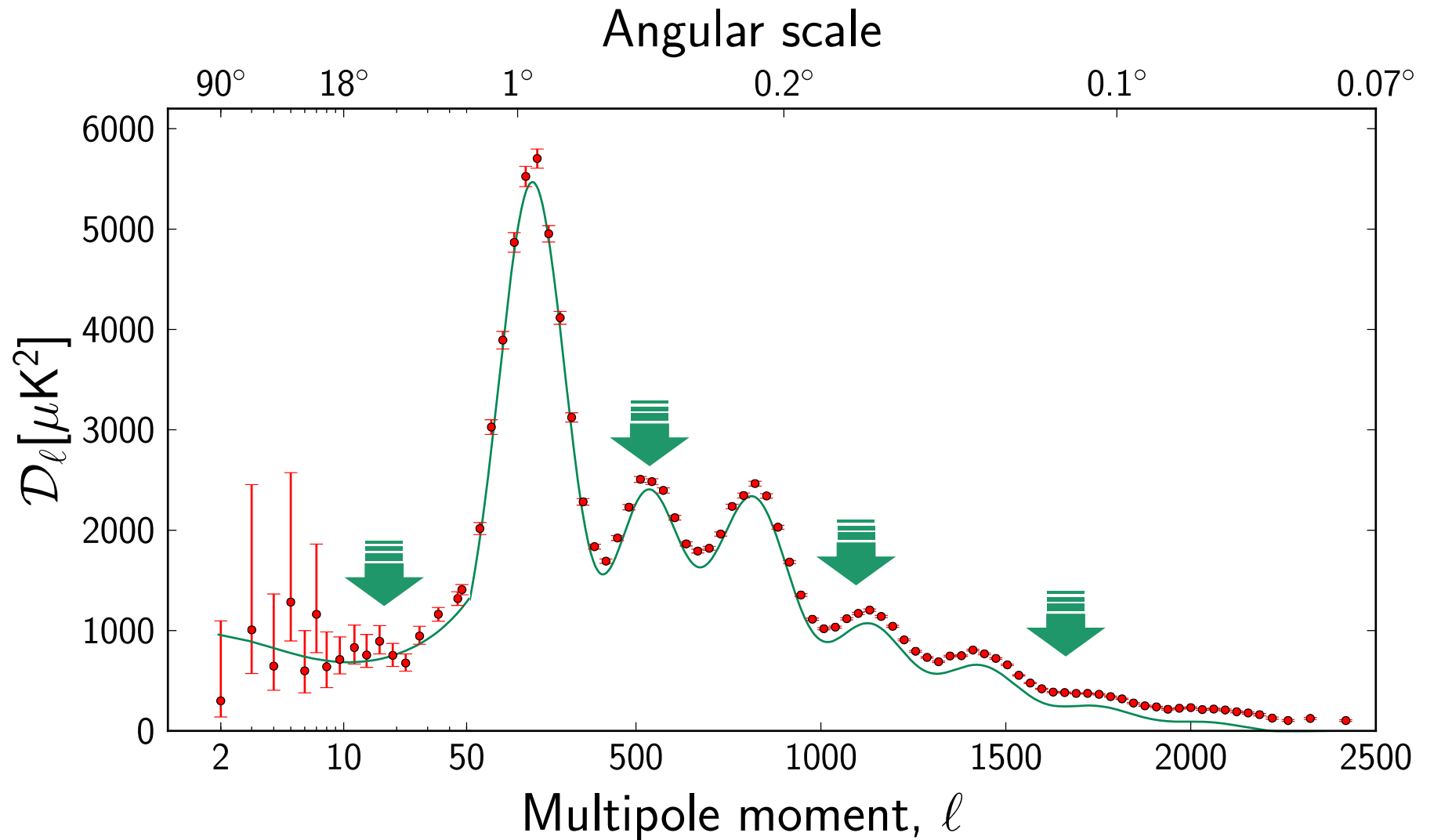
**$67.80 \pm 0.77$**

Gyr

**$13.798 \pm 0.037$**

# pourquoi ces paramètres ?

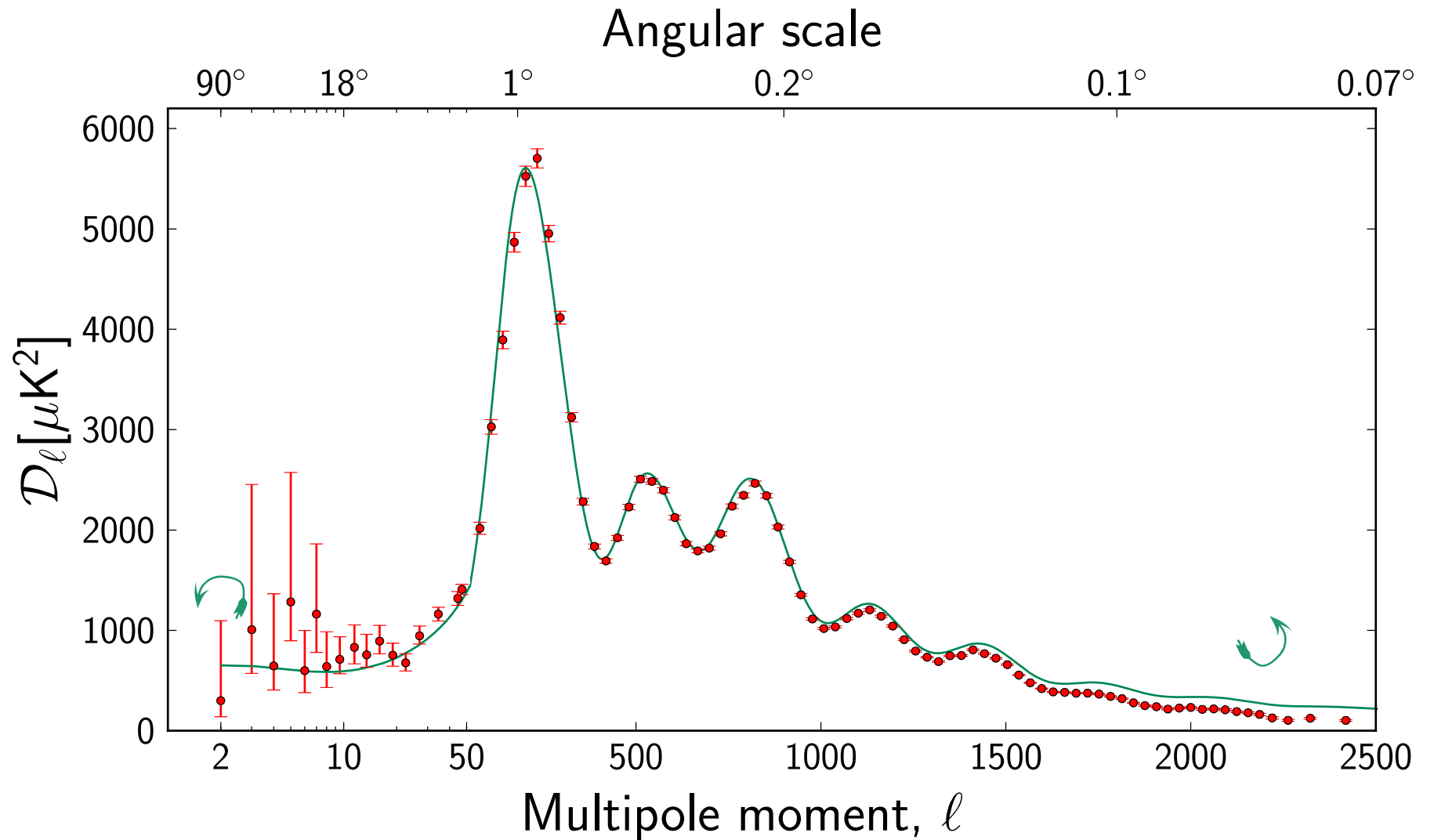
parce qu'ils permettent le meilleur ajustement aux données





# pourquoi ces paramètres ?

parce qu'ils permettent le meilleur ajustement aux données

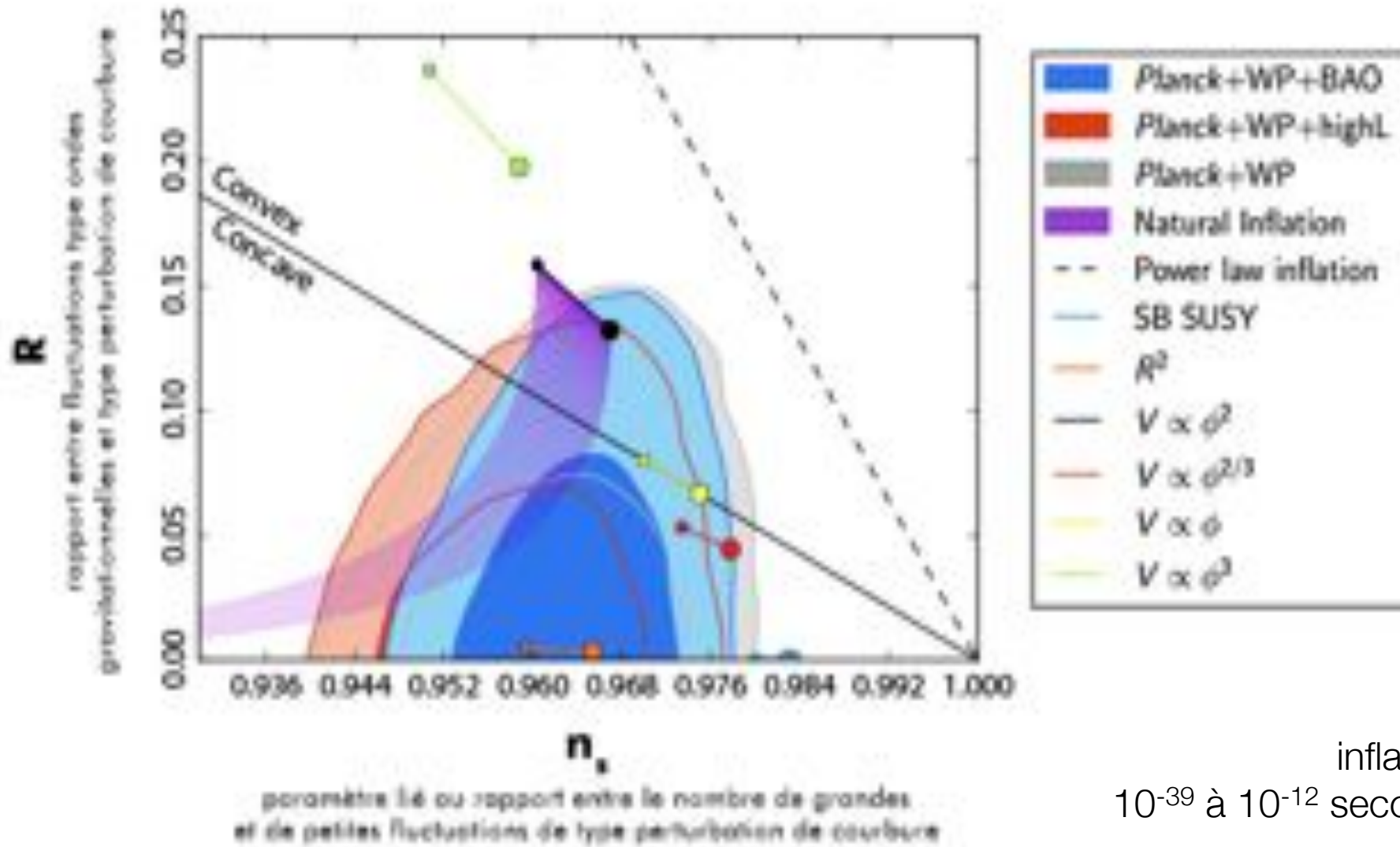


# petite démonstration: Univers dans un ordi

---

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

# 7.6 l'inflation à portée de main

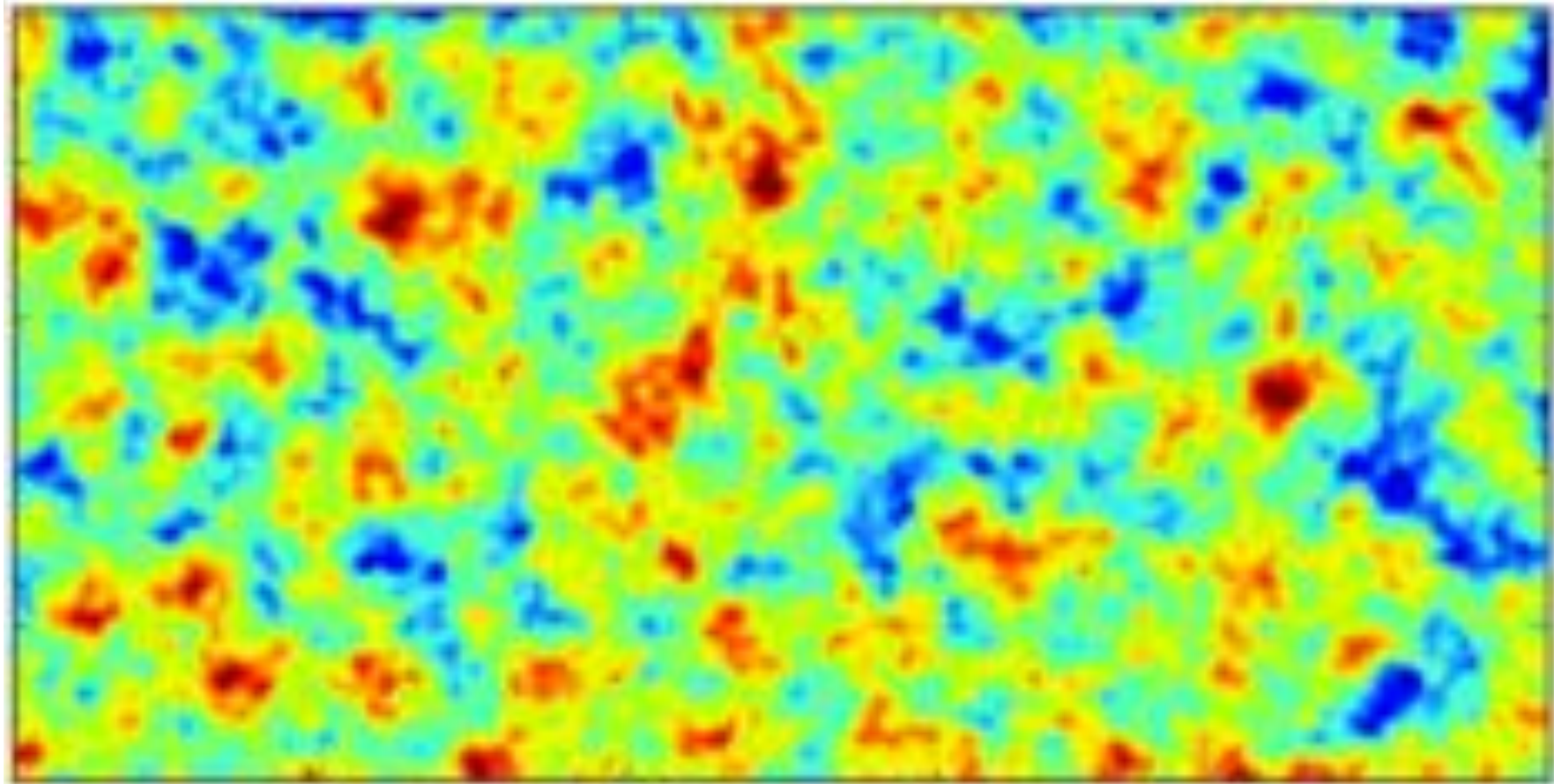


inflation:  
 $10^{-39}$  à  $10^{-12}$  seconde

# 7.7 la matière noire se révèle...

---

A simulated patch of CMB sky – before lensing



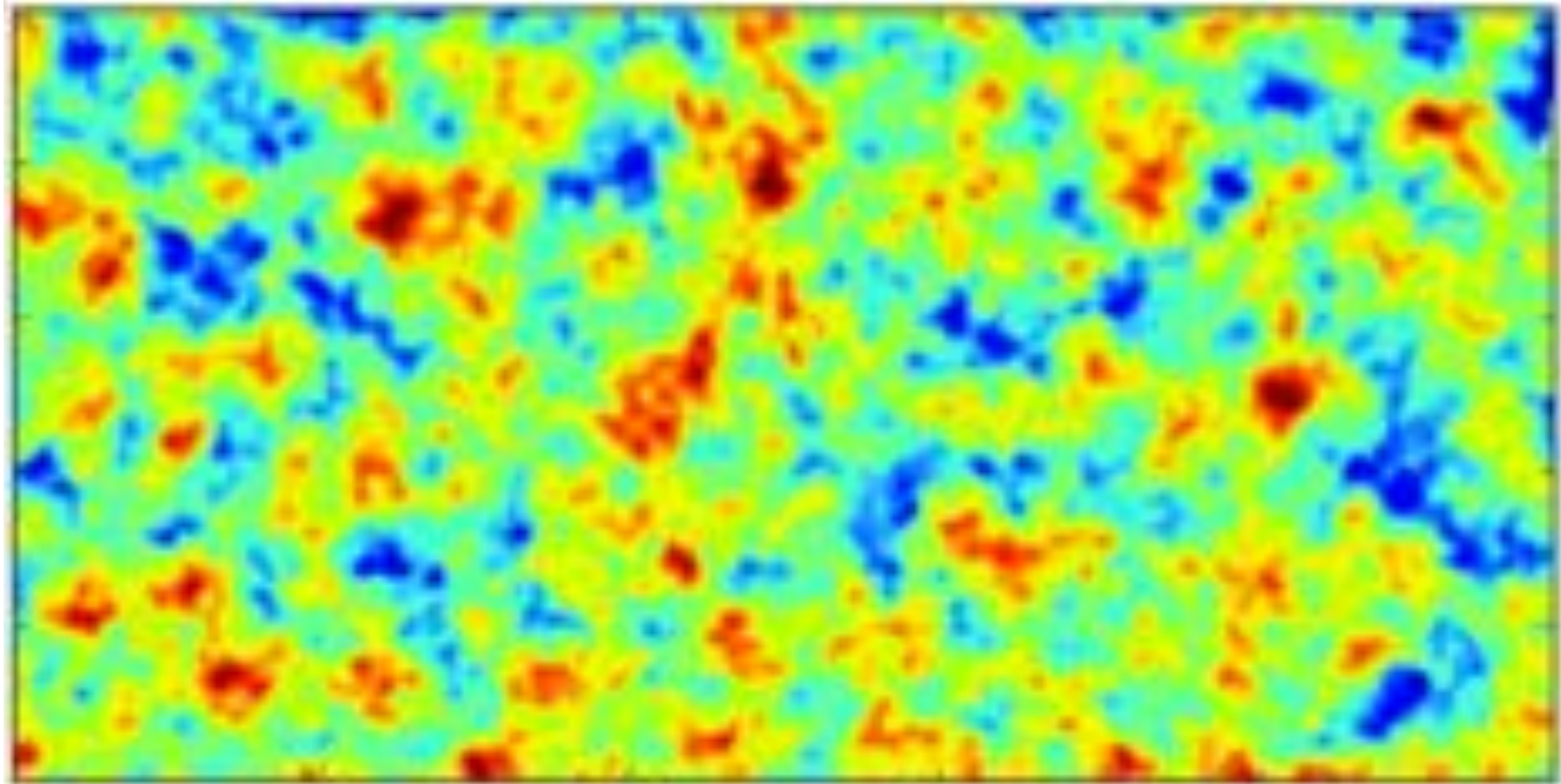
← 10° →

typical deflection: 2.4 arcmin

# 7.7 la matière noire se révèle...

---

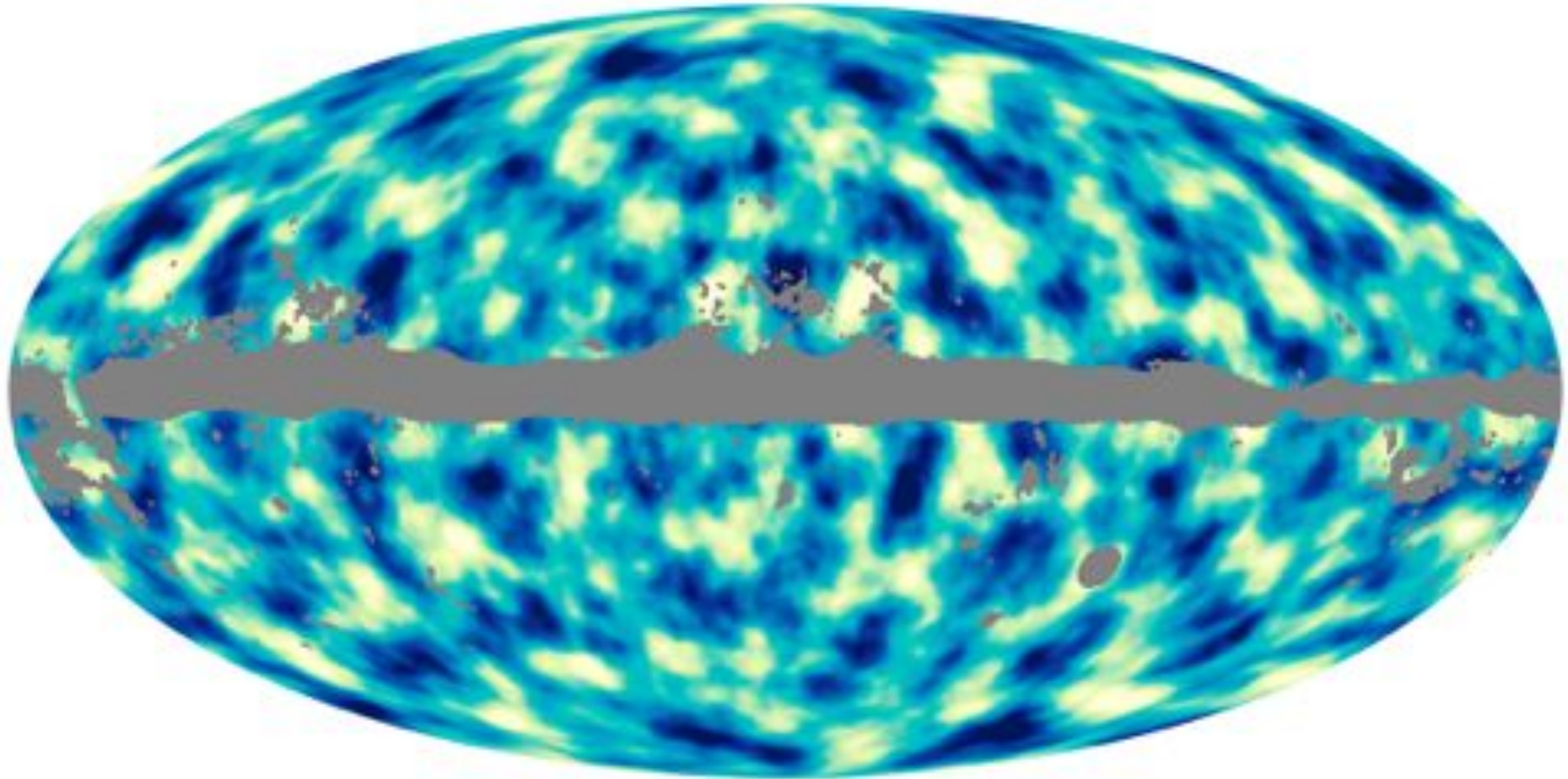
A simulated patch of CMB sky – *after lensing*



typical deflection: 2.4 arcmin

# image Planck de la matière noire

---

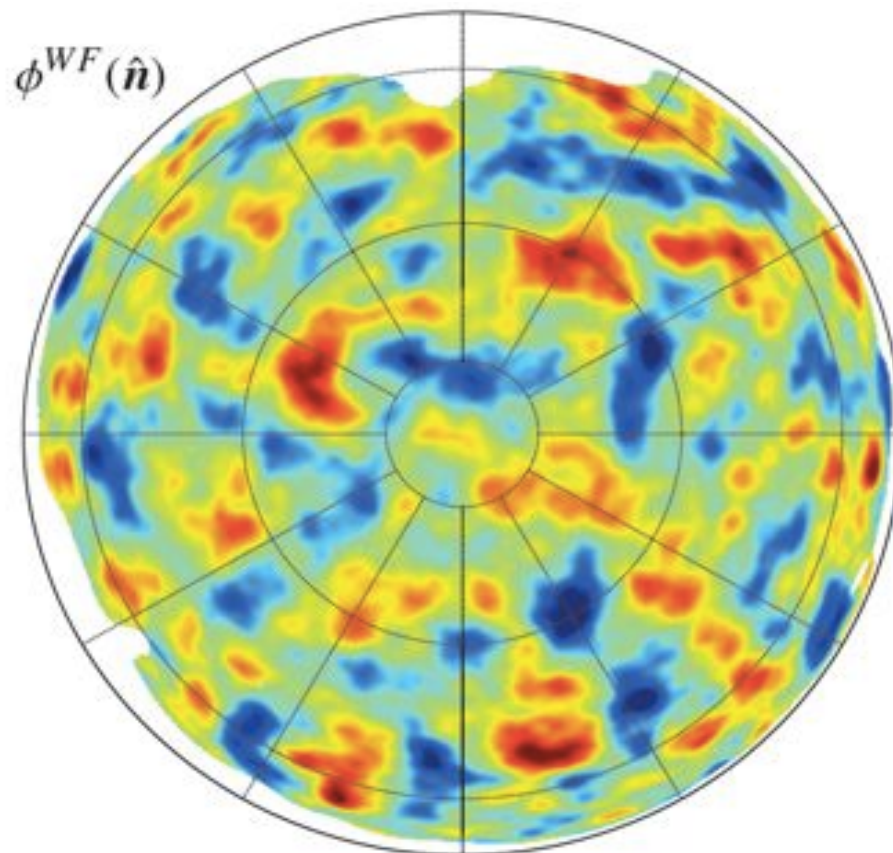


= Carte de la masse projetée sur la ligne de visée

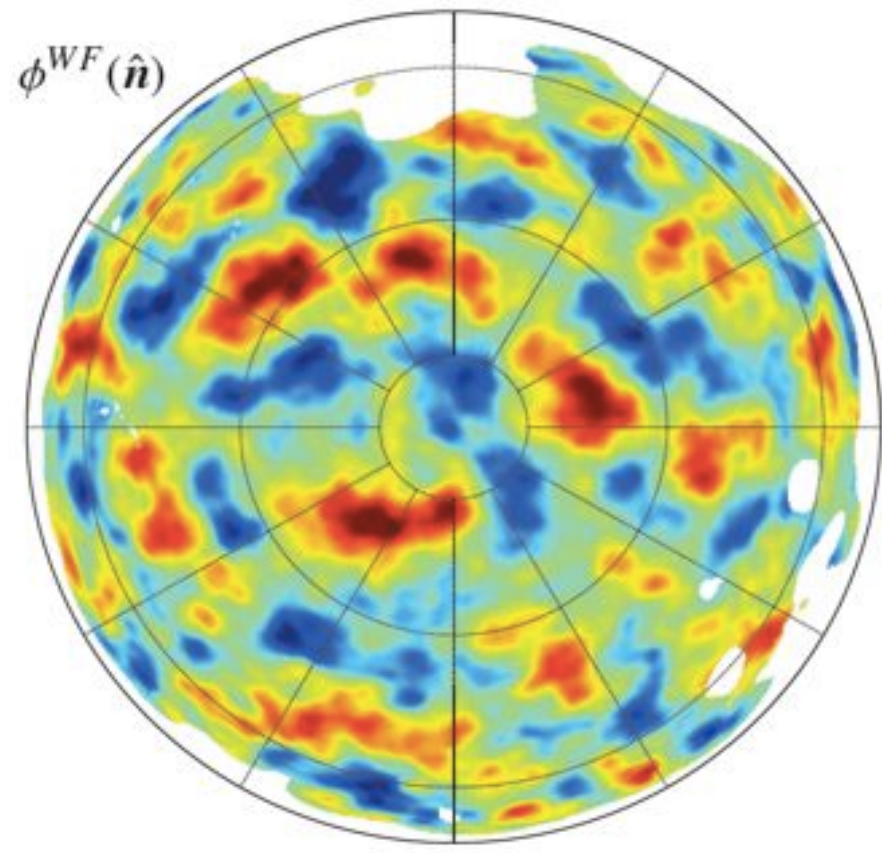
Planck 15 months  
Planck Collaboration, 2013, 17

# Planck all-sky map of the dark matter

---



Galactic North



Galactic South

---

## 8. résumé



# 8. résumé

---

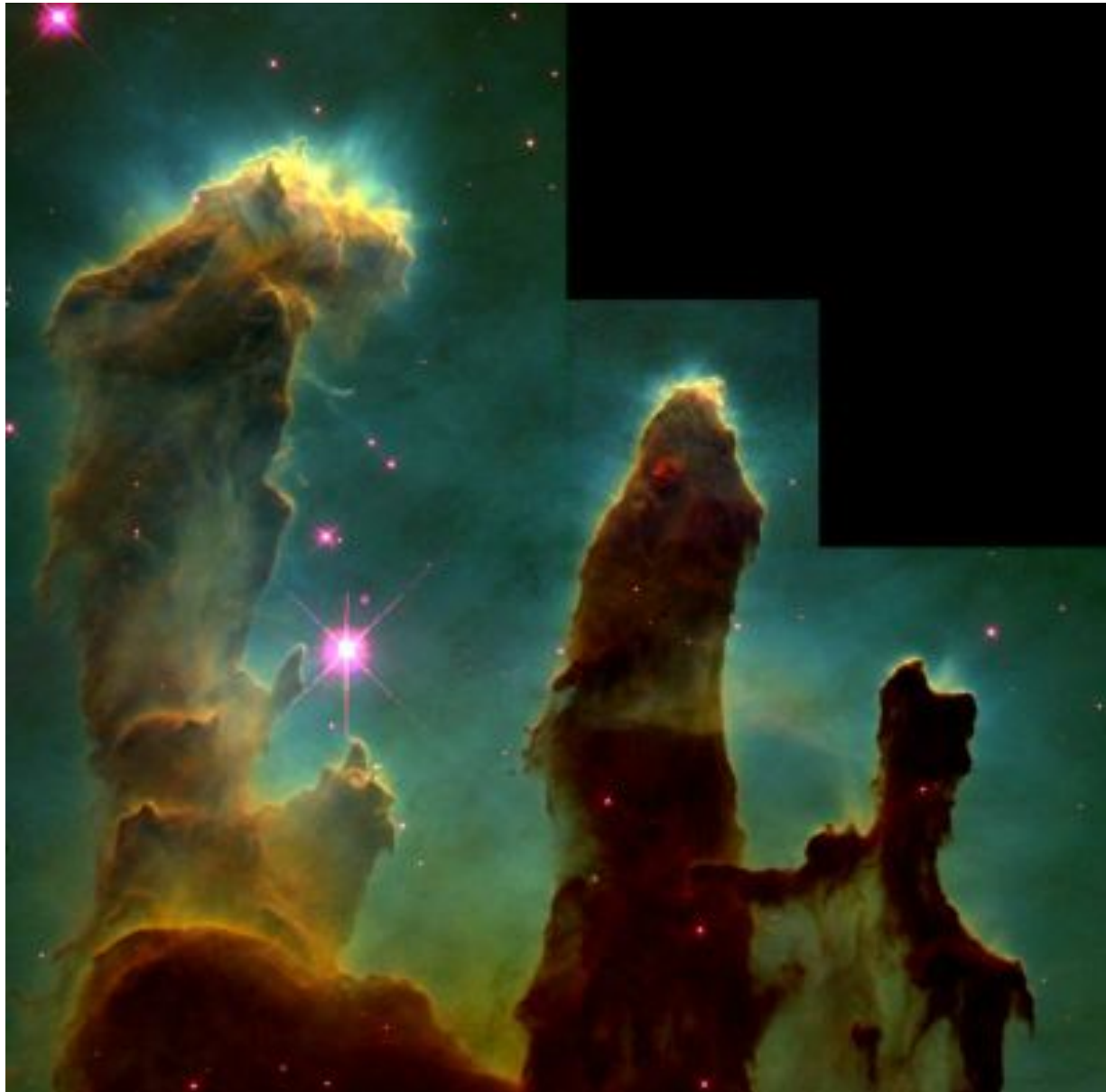
- but: comprendre la **structure**, l'**évolution** et les **lois physiques fondamentales** régissant l'univers et ses constituants
- **confrontation théorie – données**
- l'**astrophysique** est une science
- la **nuit noire**
  - est la signature de l'**expansion** de l'Univers
- la nuit n'est **pas** 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

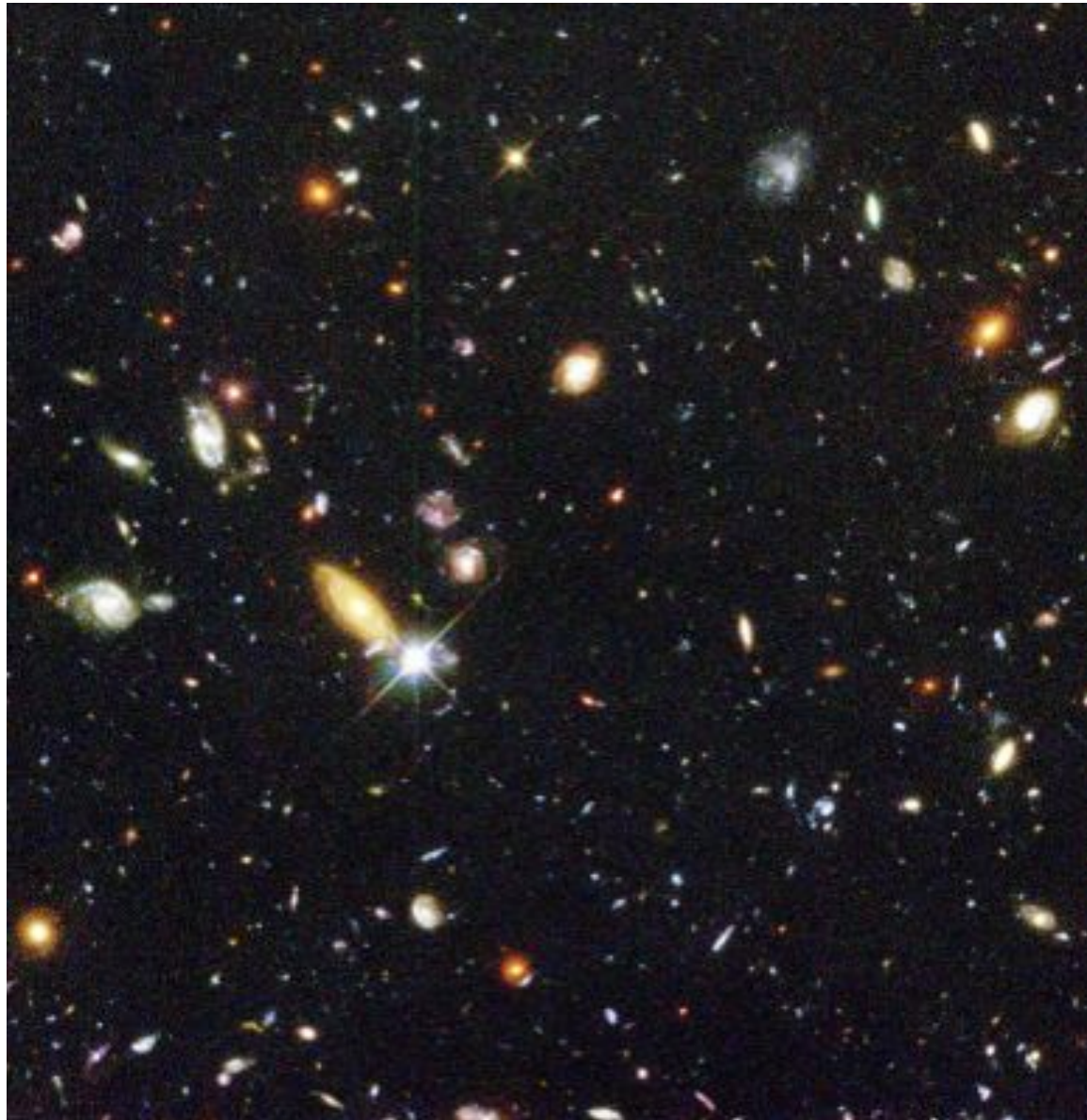
# remarques finales

---



# remarques finales

---



# remarques finales

---



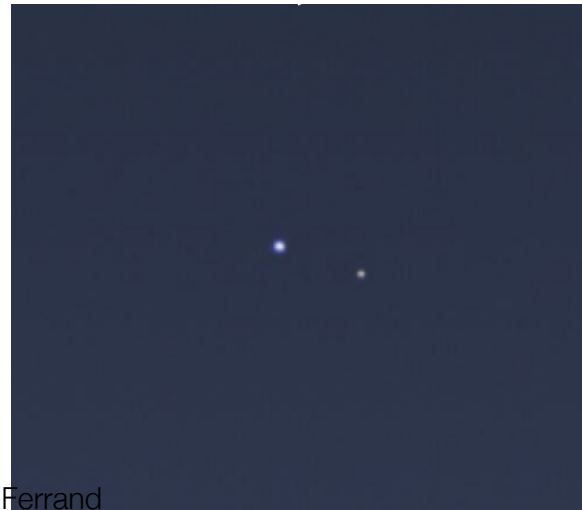
# remarques finales

---



# remarques finales

---



# remarques finales

---





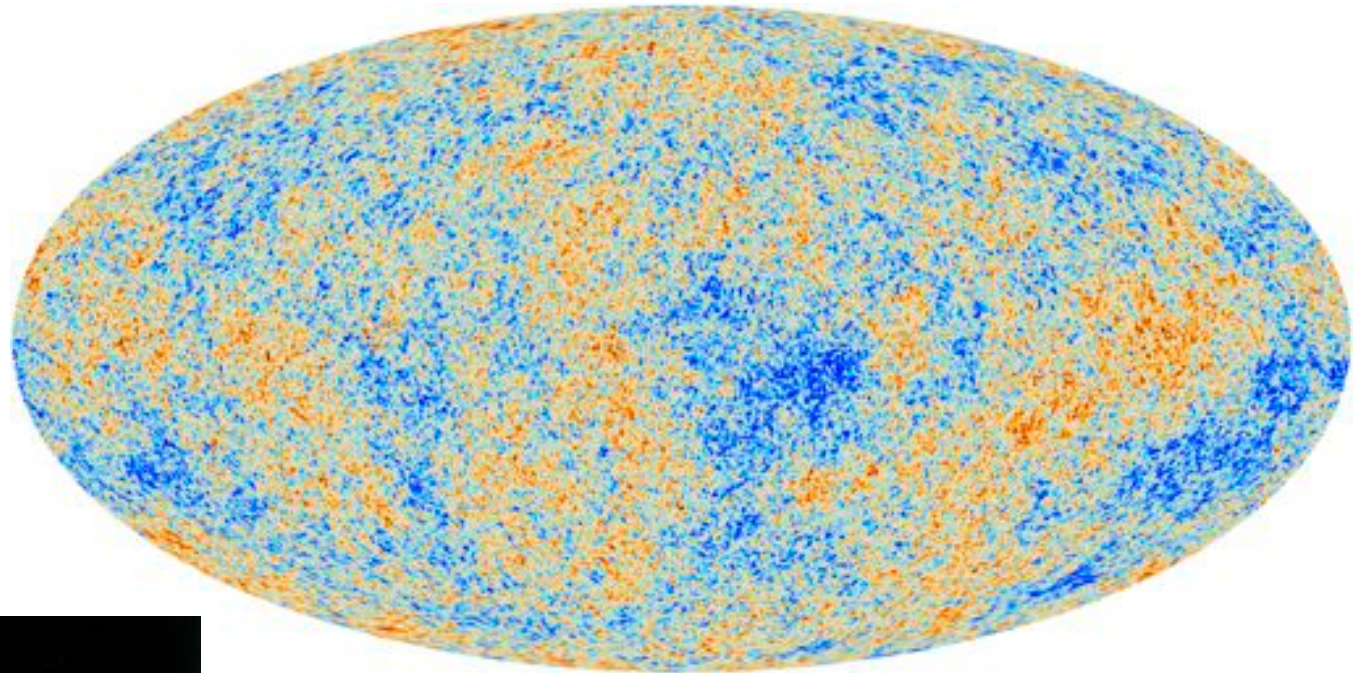
# remarques finales

---



# remarques finales

---



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

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