

$\Omega_m$

$\Lambda$

$\Sigma m_\nu$

$\Omega_b$

$r$

$H_0$

$n_s$

$N_{\text{eff}}$

$A_s$

# Cosmologie aujourd'hui

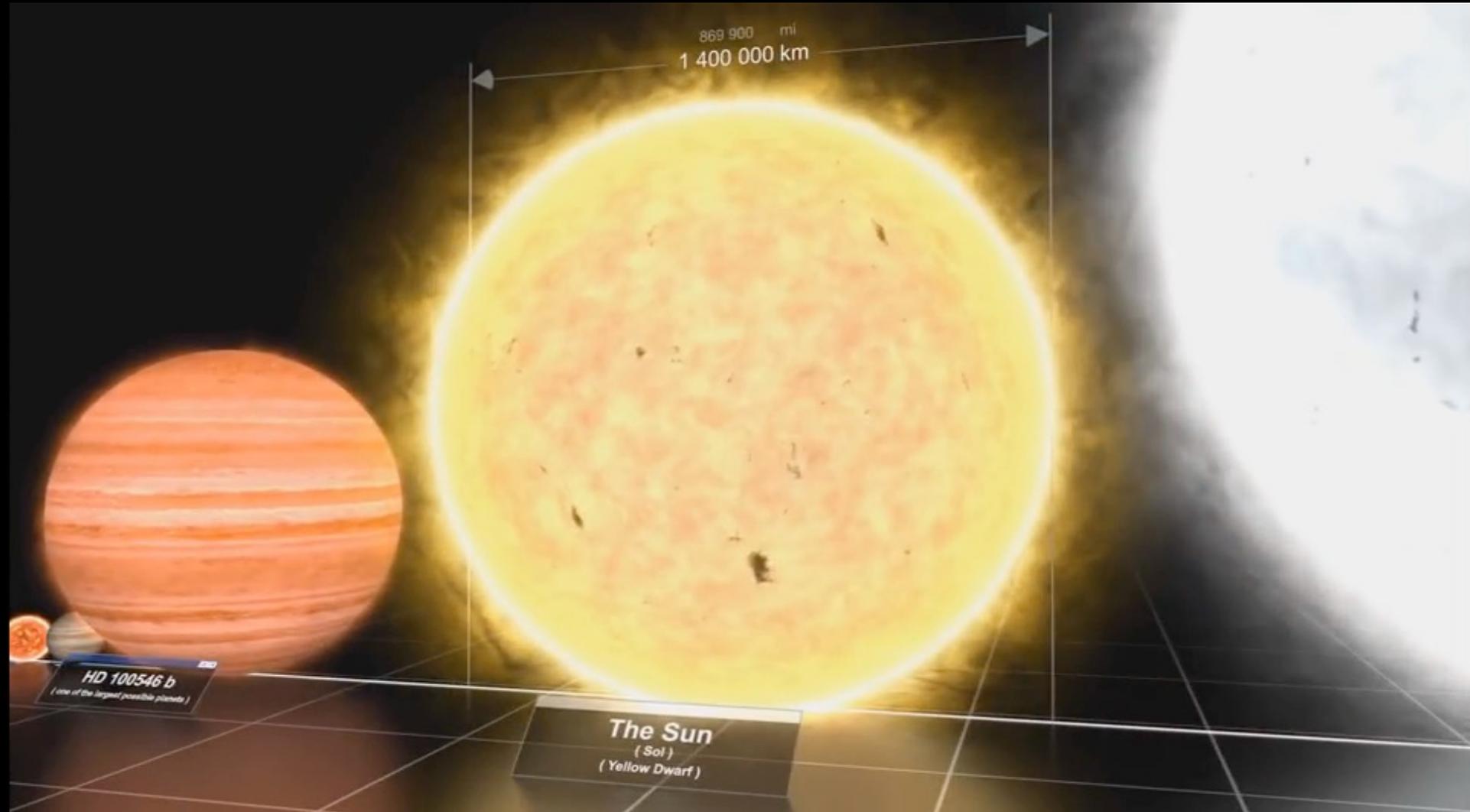
## Réponses et questions



# Questions cosmologiques

- De quoi l'Univers est-il constitué?
- Comment est-il organisé/structuré?
- Quelle est son histoire?
- Comment sont apparues les structures qu'ont y observe?
- Quelle ultime destinée?
  
- Questions de toujours et réponses d'aujourd'hui par l'astrophysique

# Un premier tour de l'Univers en 3 mn...



extrait de "6mn pour voir la taille de l'Univers"

# Les étoiles naissent au sein d'immenses nuages de gaz

---

Ici « les Piliers de la création » (la nébuleuse de l'aigle), tout juste « revisités » par JWST



# 2019: Première image d'un trou noir



*NB: On voit l'image du disque  
d'accrétion, y compris derrière  
le trou noir...*

M87\*, le trou noir supermassif au cœur de la galaxie M87, situé à 55 millions d'années-lumière de la Terre dont la masse équivaut à 6,5 milliards de masses solaires.

# Le ciel à plat



On représente une sphère sur un plan en choisissant une projection.

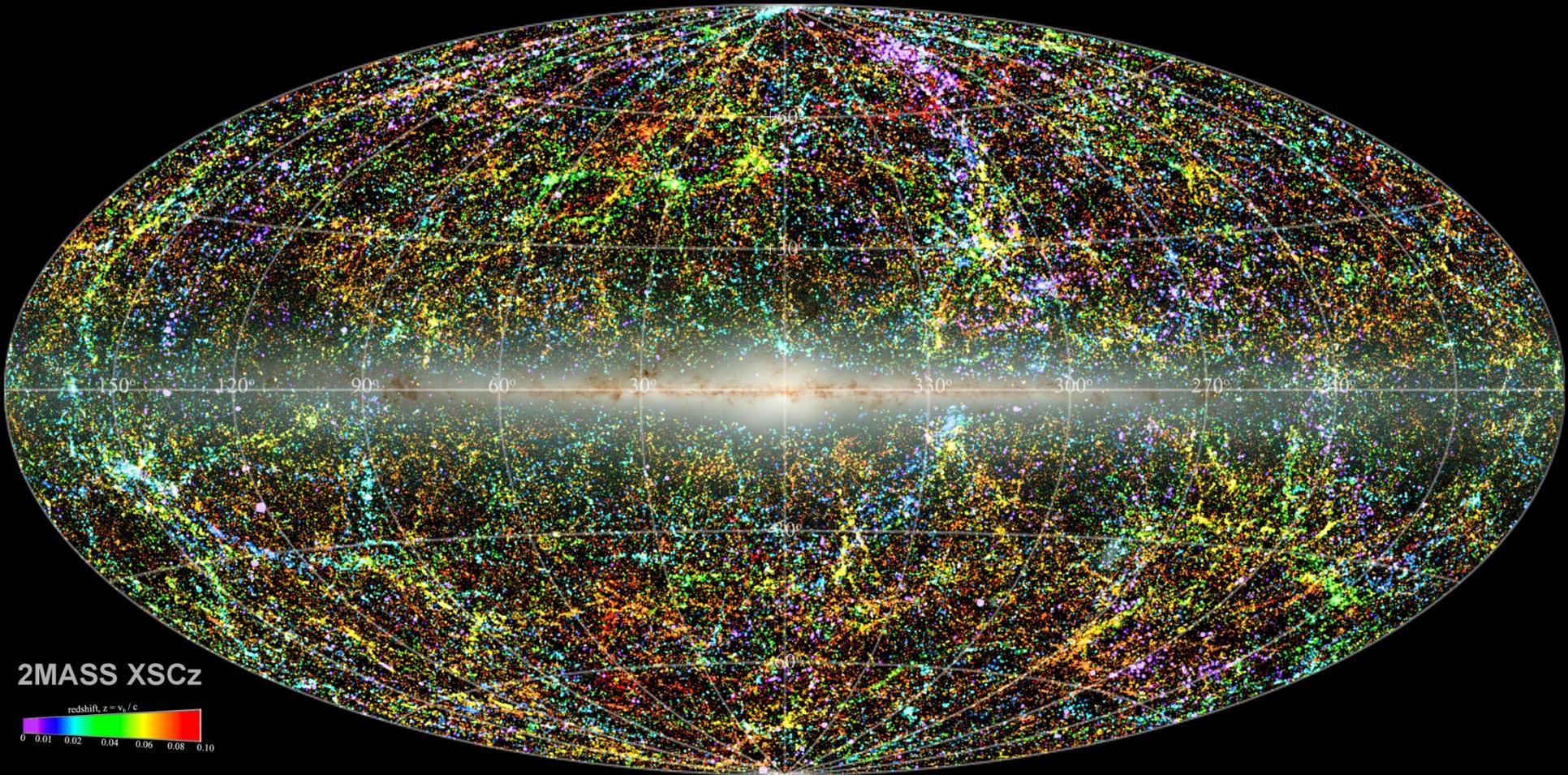


*Ici la projection mollweide*



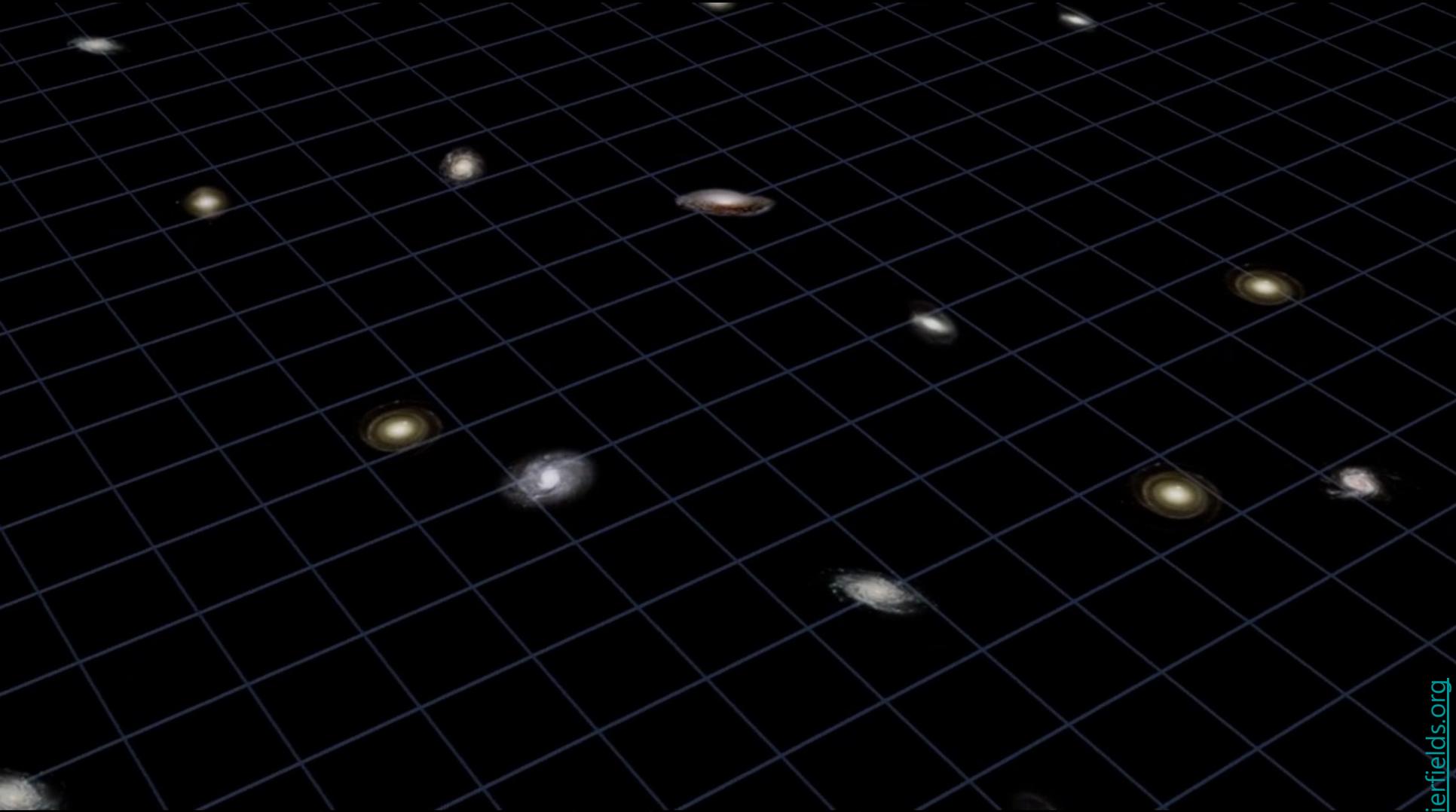


# Le ciel des galaxies "proches"



*La plus proche, M31, est quand même à ~2,5 Million d'années-lumière !*

# Notre Univers est en expansion...



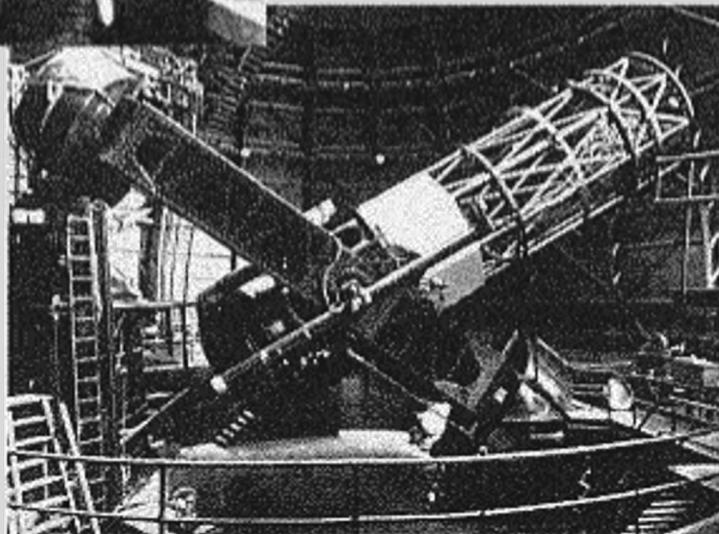
*La lumière émise dans le passé est décalée vers le rouge.  
(proportionnellement à l'éloignement)*

# L'expansion de l'espace...

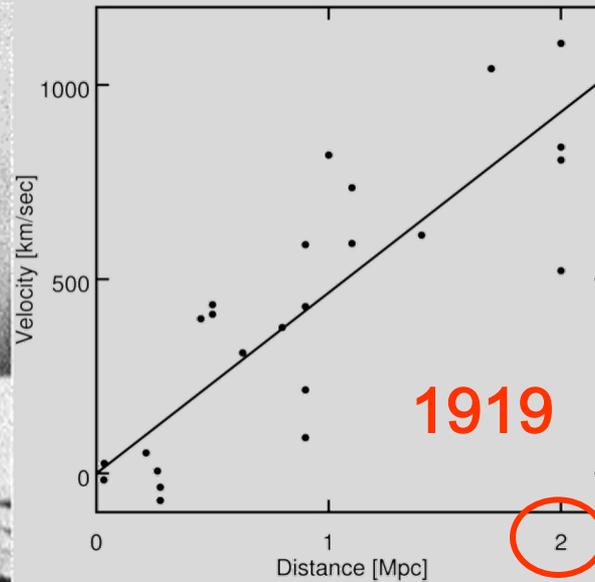


Edwin Hubble

(à la suite de  
Vesto Slipher)  
Et de Georges  
Lemaître

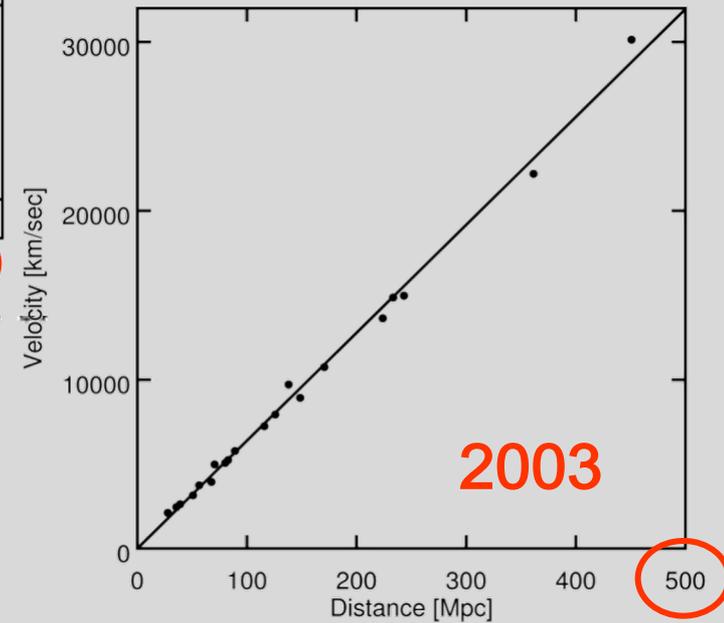


Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope



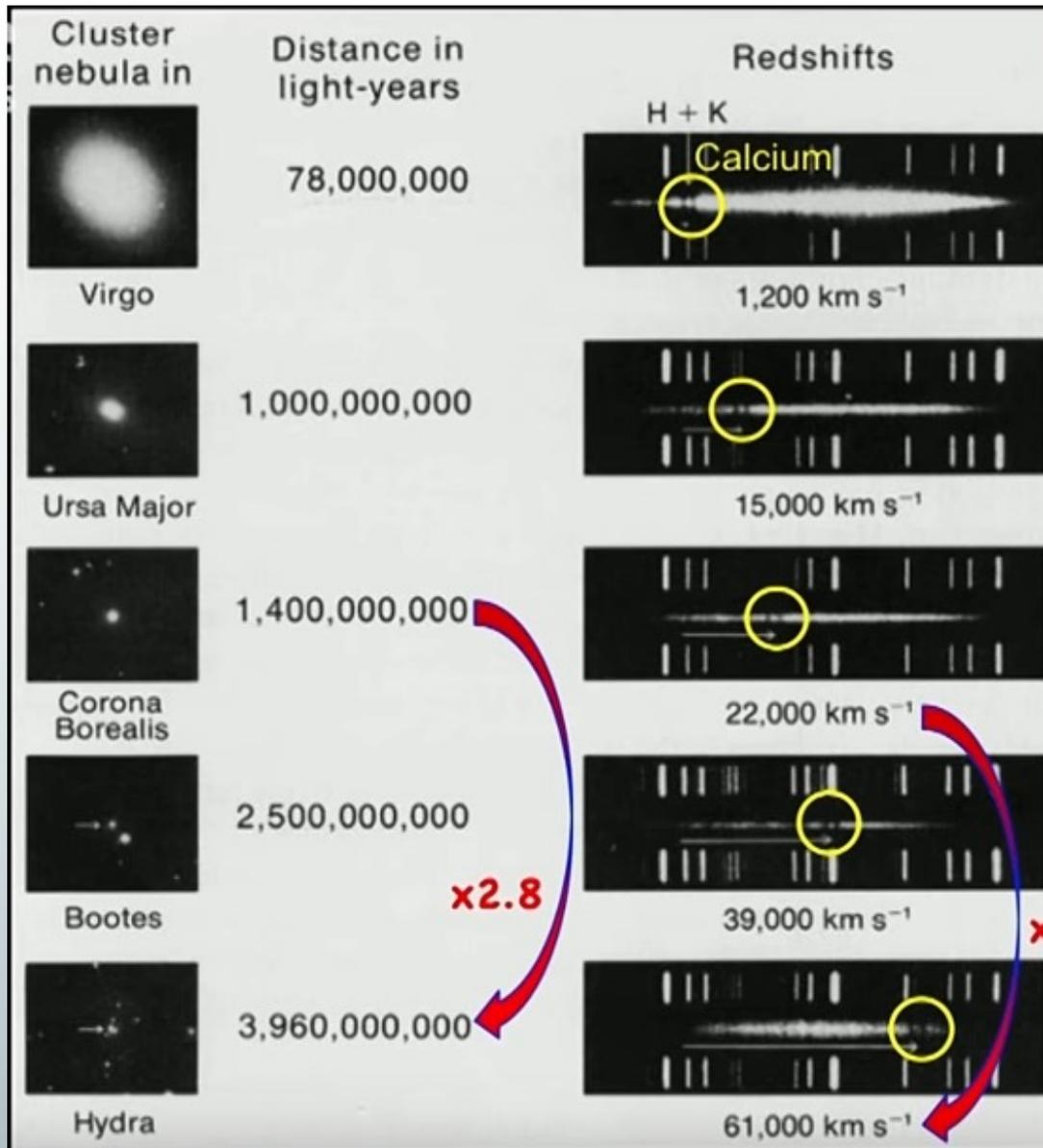
$$v = Hr$$

$$(v \ll c)$$



...permet de mesurer la distance d'objets lointains ( $z = \Delta\lambda/\lambda = v/c$ )

# En pratique...

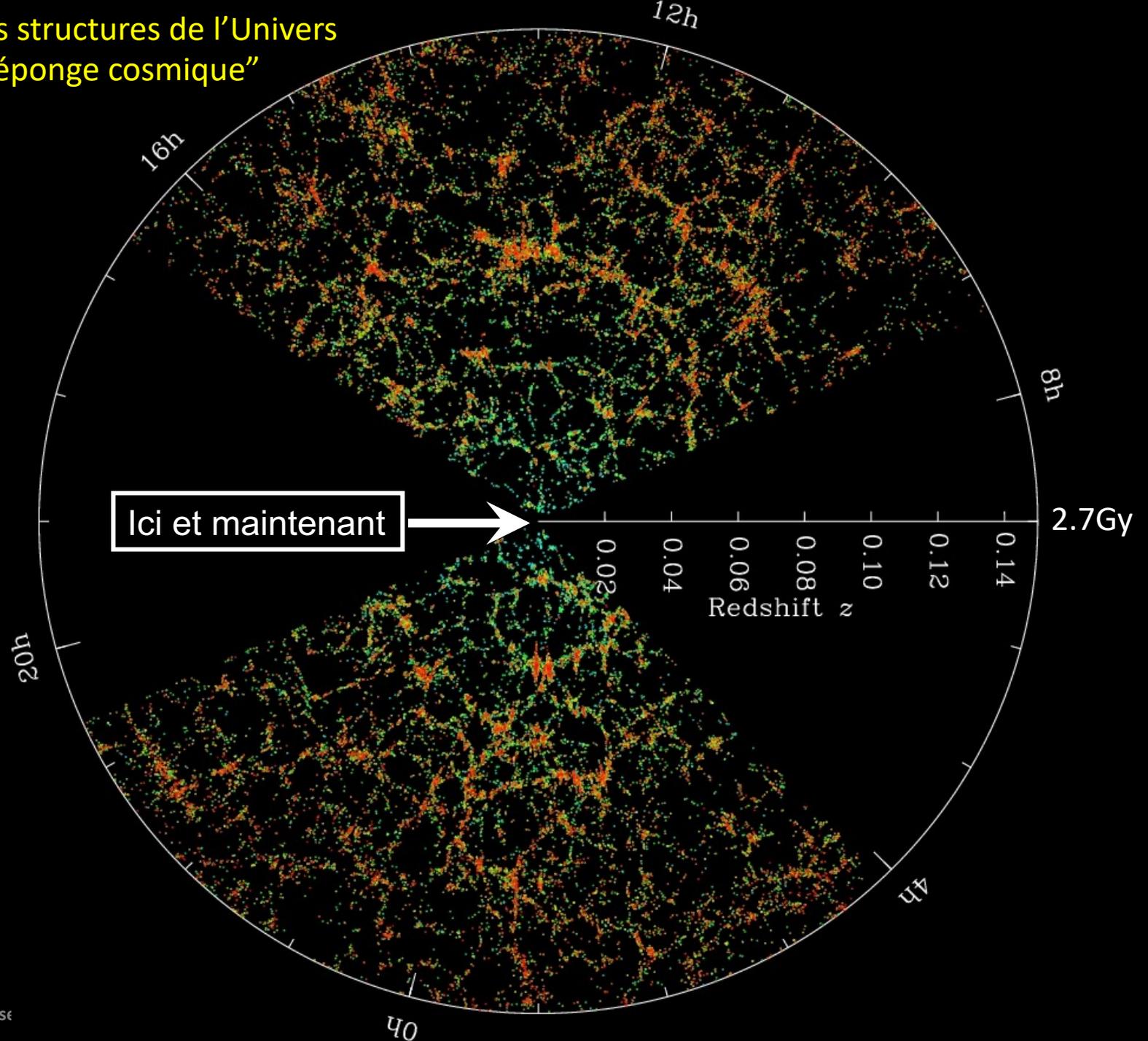


La vitesse apparaît comme proportionnelle à la distance

$$V = H r$$

(au moins quand on ne regarde pas trop loin)

# Les grandes structures de l'Univers ou "l'éponge cosmique"



# Voir loin c'est voir dans le passé

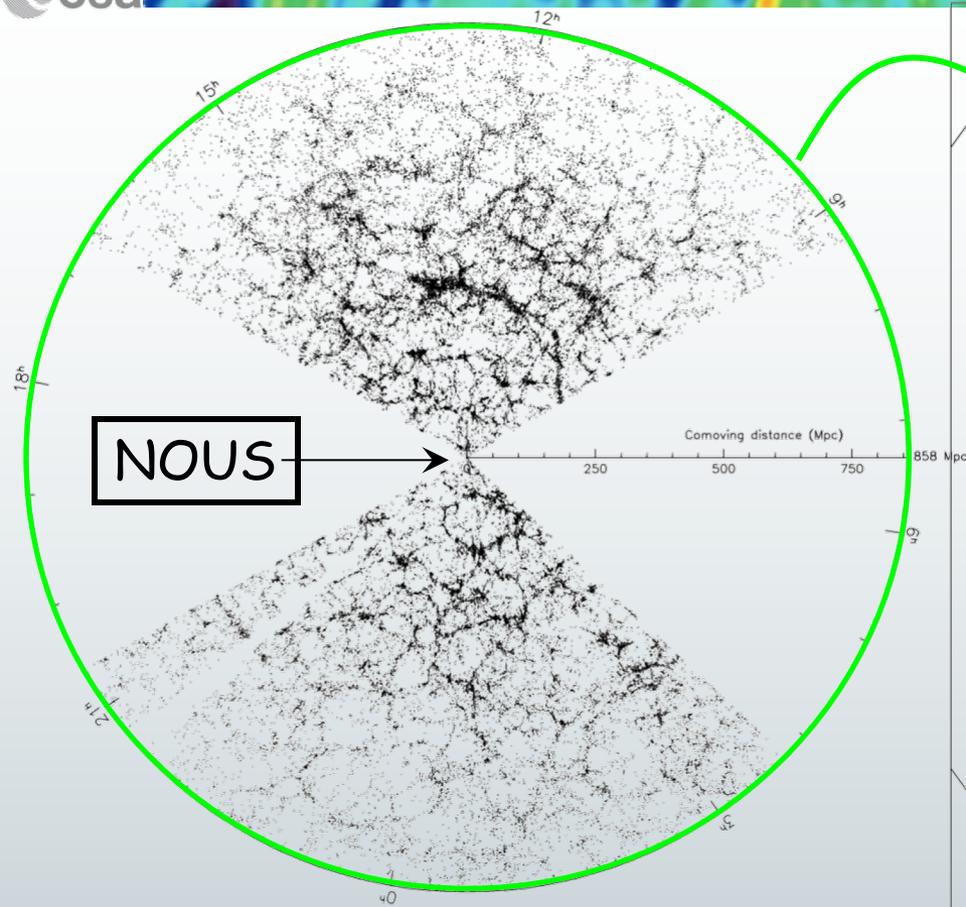


Notre vision de la lune est toujours 1.3s dans le passé

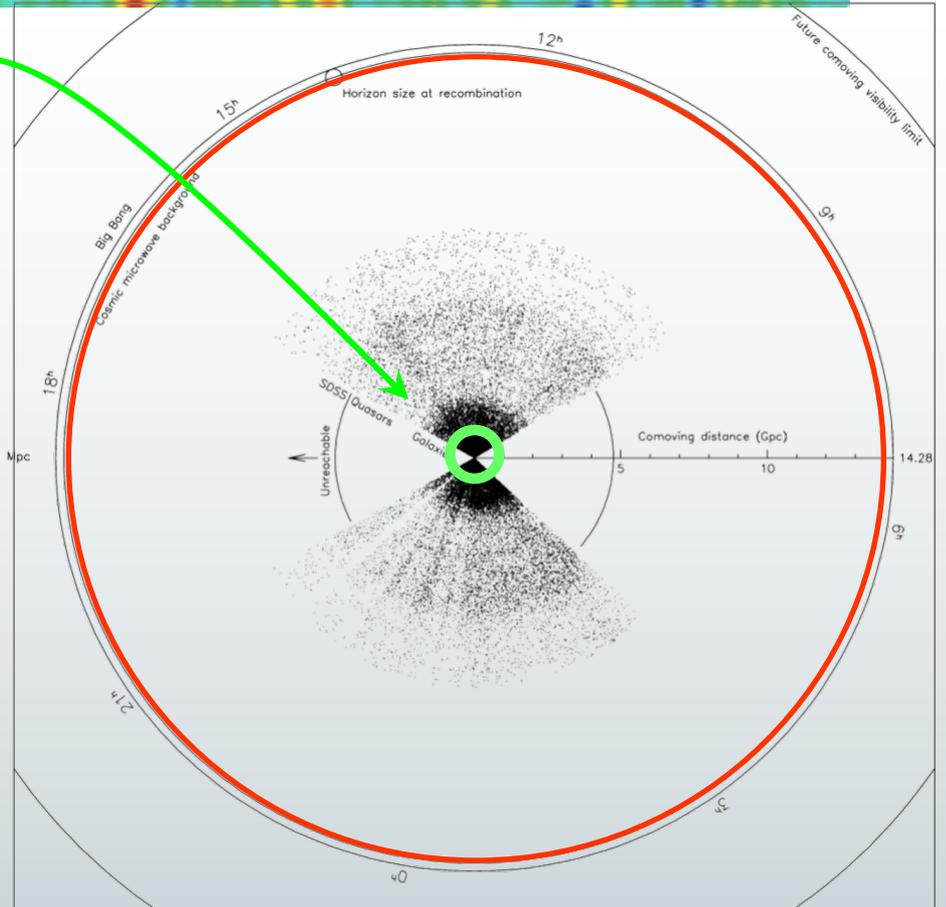
Notre vision de Mars est toujours 14min dans le passé

Les données de Rosetta sont vieilles de 25 minutes

# Voir très loin, c'est voir le passé lointain !



Chaque point est une galaxie comme la Notre. La plus proche, M31, est à ~2,5 Mal. Il faut 2,7 milliards d'années à la lumière d'une galaxie sur le cercle vert pour qu'elle nous parvienne.



La lumière millimétrique a mis environ 13 milliards d'années pour nous parvenir (cercle rouge). C'est la trace (comme fossilisée) de la fournaise primordiale, 400 000 ans après le Bang, quand l'Univers est devenu Transparent.



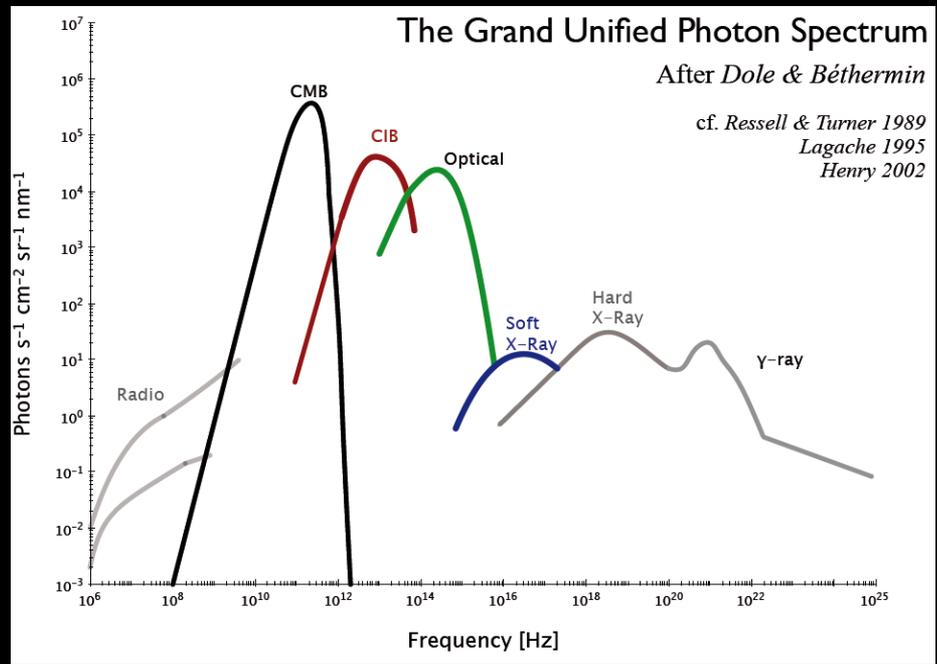
**Nous sommes baignés par la lumière du big bang. À cause de l'expansion, elle est décalée vers le rouge dans les micro-ondes et les ondes radios.**

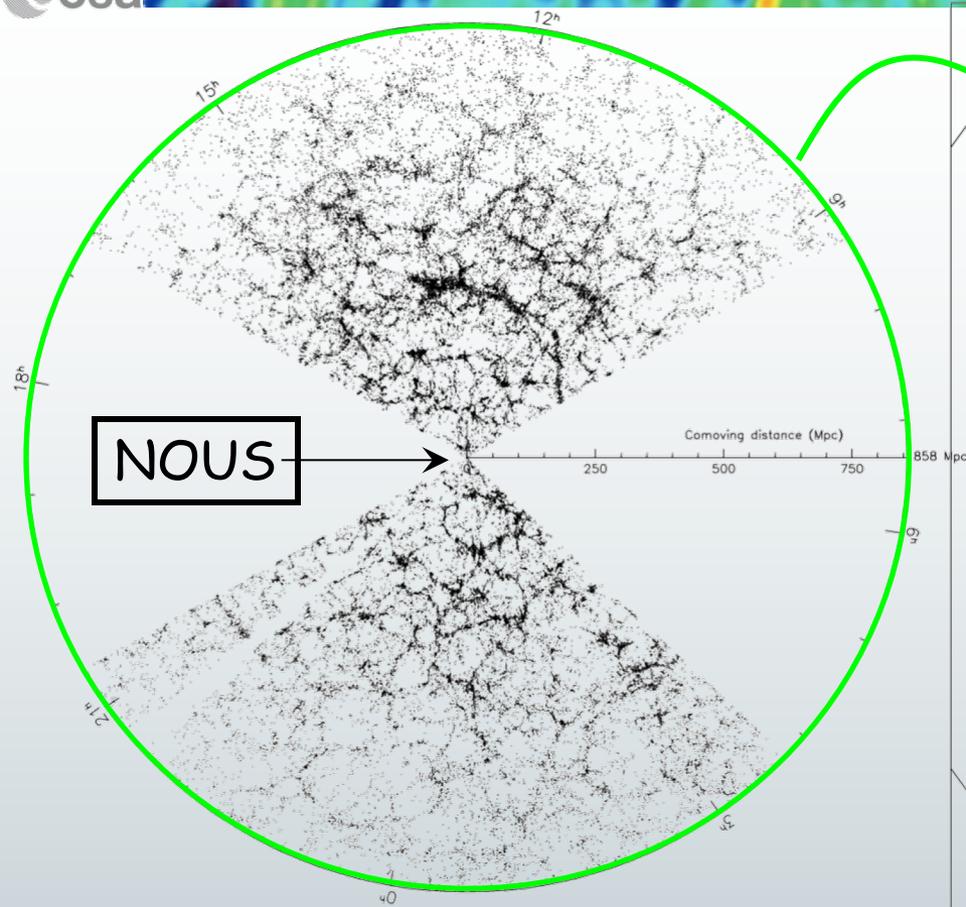
On peut voir ce rayonnement sur un poste de télévision mal réglé !!!

**Les photons du rayonnement fossile sont les plus nombreux.**

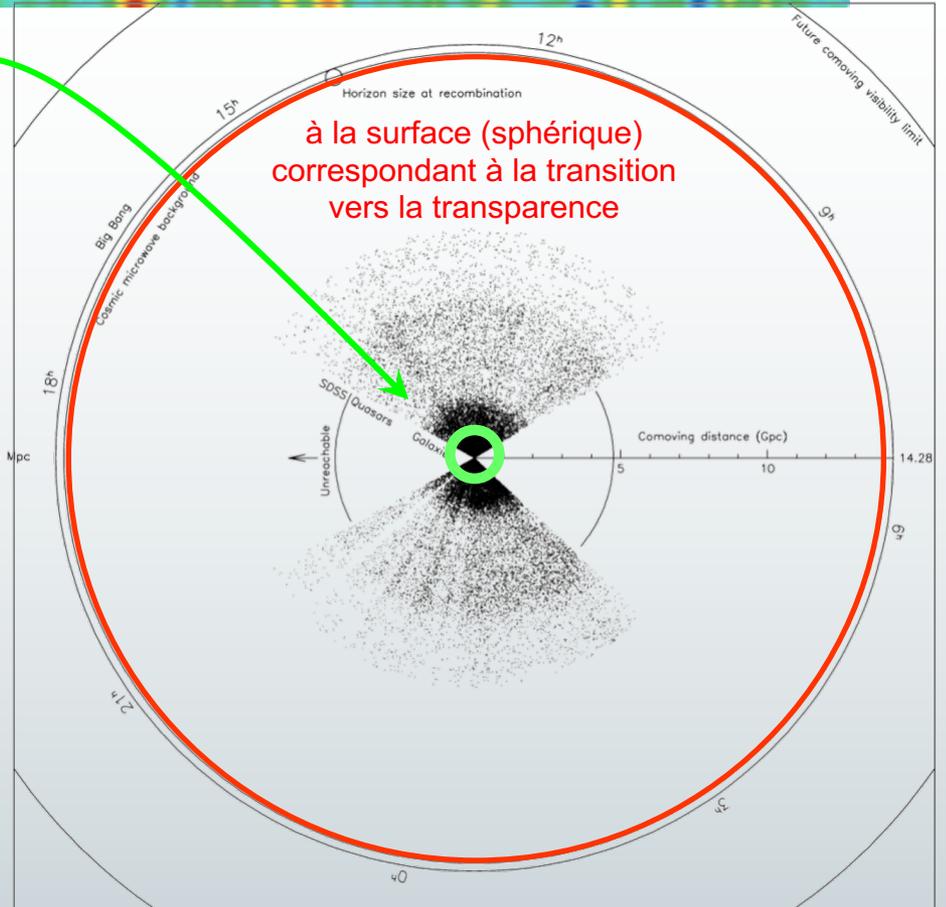
**Il est donc facile de voir le big bang.**

**Pas besoin d'un telescope géant, il suffit de bien s'y prendre !**



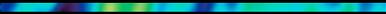


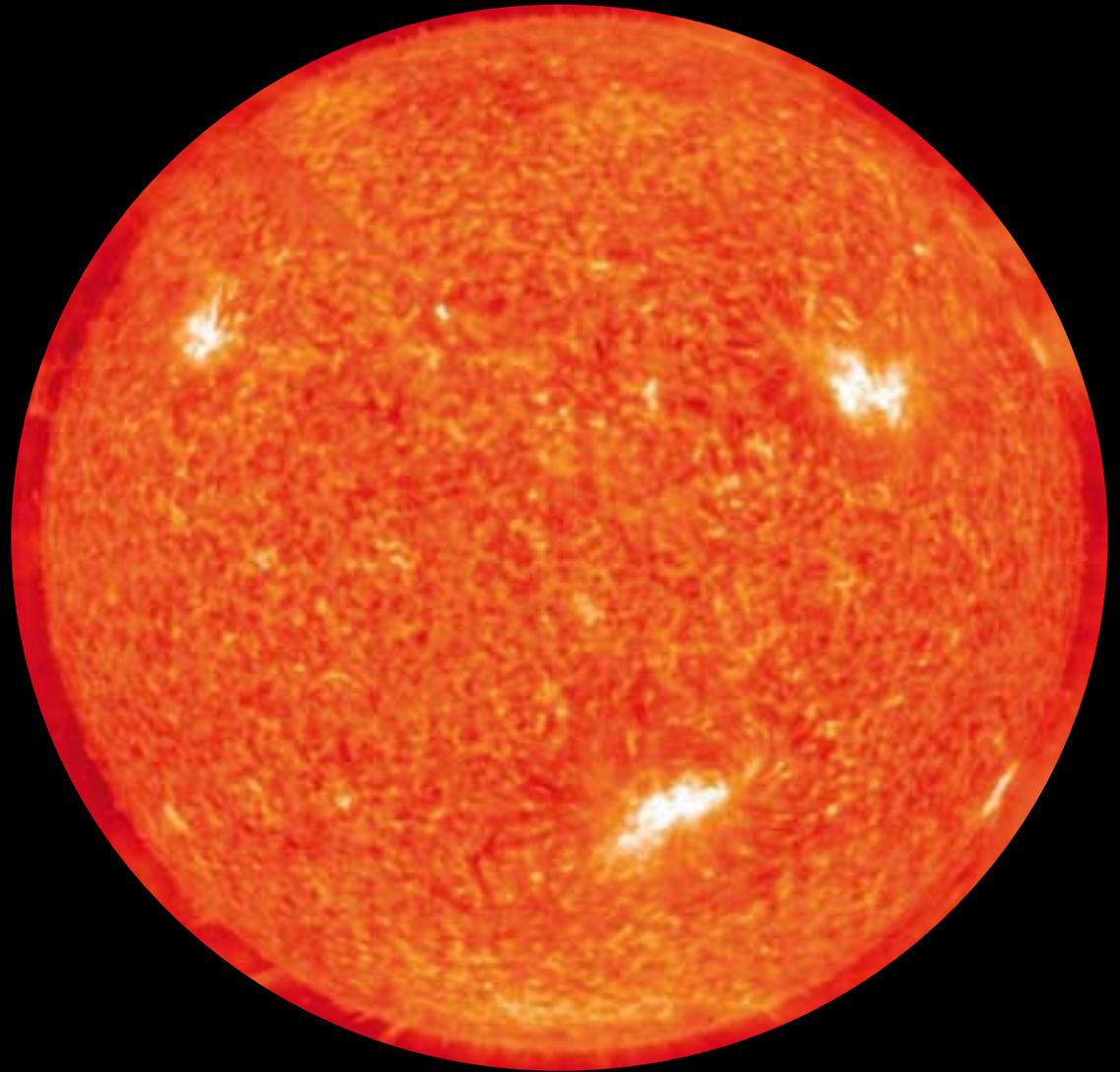
Chaque point est une galaxie comme la Notre. La plus proche, M31, est à ~2,5 Mal. Il faut 2,7 milliards d'années à la lumière d'une galaxie sur le cercle vert pour qu'elle nous parvienne.



La lumière millimétrique a mis environ 13 milliards d'années pour nous parvenir (cercle rouge). C'est la trace (comme fossilisée) de la fournaise primordiale, 400 000 ans après le Bang, quand l'Univers est devenu transparent.

# Une autre surface de transition vers la transparence.

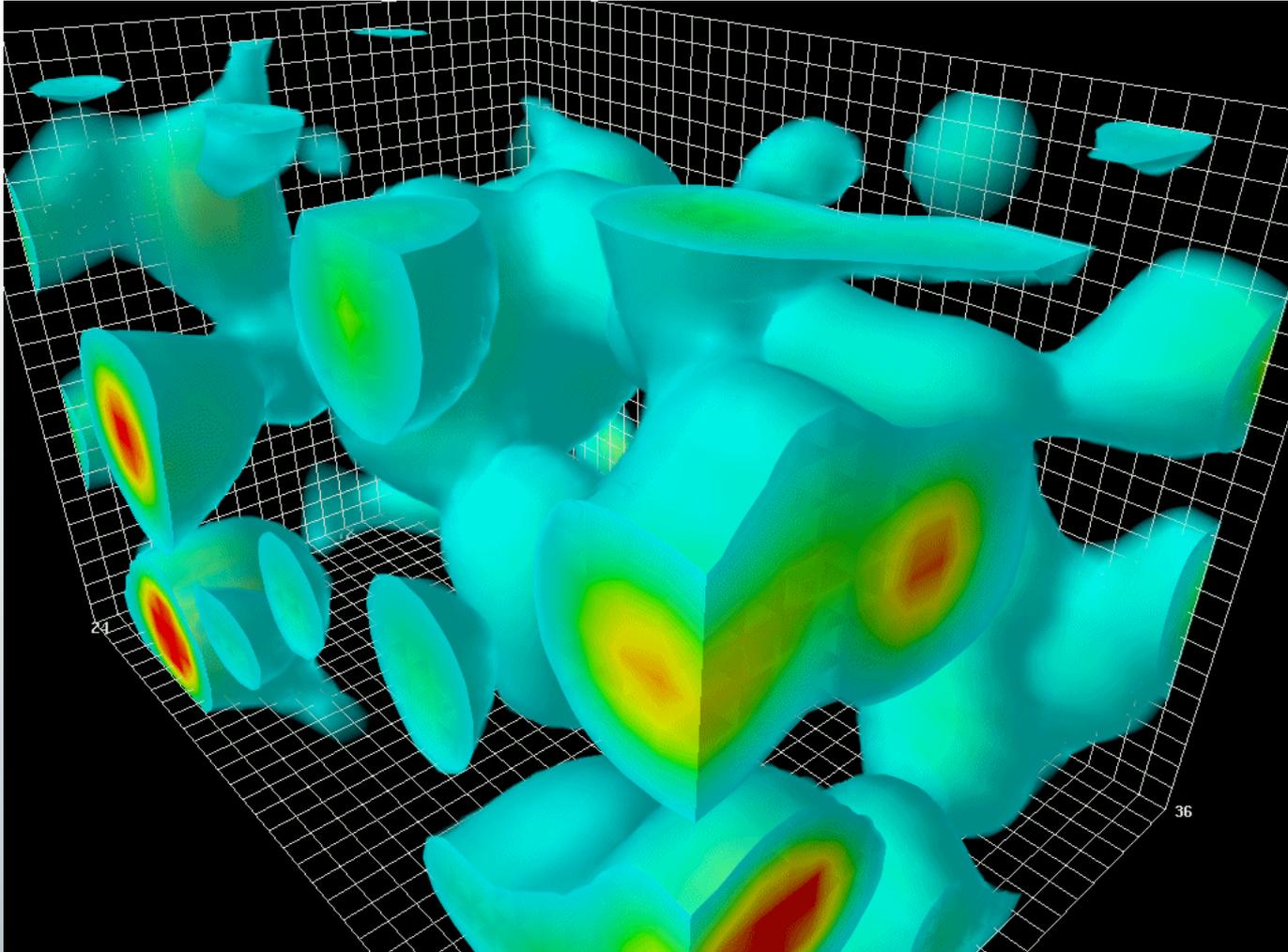
-  Le soleil est aussi un plasma.
- On ne voit que sa surface, l'intérieur est opaque.
- Les photons qui nous parviennent du soleil n'interagissent plus avec le plasma, il diffusent une dernière fois, formant la surface du soleil avant de nous parvenir.
- En étudiant la surface du soleil, on déduit son fonctionnement à l'intérieur, bien qu'on ne puisse l'observer directement



- L'idée de l'existence d'une phase d'inflation a été introduite dans les années 70 (initialement pour résoudre des problèmes de physique des particules considérée dans un contexte cosmologique).
- Imaginez un Univers vide. Une phase d'expansion exponentielle (d'inflation) peut néanmoins être produite par l'effet gravitationnel de l'énergie du vide (quantique); à la fin de la phase d'inflation, l'énergie du vide est convertie en matière et rayonnement.
- Au cours de cette phase d'expansion, les fluctuations quantiques du vide, irrépessibles, sont dilatées gravitationnellement à des échelles cosmologique. Une partie de ces fluctuations va initier la croissance de la complexité.
- Le vide est donc probablement l'origine ultime du contenu de l'Univers et de sa structuration...
- Ce mécanisme conduit à nombre de prédictions, et en particulier que notre horizon cosmique (la surface correspondant à la transition vers la transparence) soit grumeleuse, et que son apparence révèle les caractéristiques des grumeaux primordiaux et celles du milieu dans lequel il se sont développés.

# Le vide n'est pas le néant!

Le monde microscopique est régi par la mécanique quantique.  
Le vide (quantique) est le siège de fluctuations que l'on peut simuler.



Quoique fugaces ces fluctuations de densité d'énergie contribuent à **l'énergie du vide**

*Planck era*

( $T=10^{25}\text{eV ?}$ )

( $T=3000\text{ K}$   
 $=0.3\text{eV}$ )

**INFLATION**

**CMB  
last scattering**

**fraction  
of a second**

**first  
stars**

( $T=2.725\text{ K}$ )

**380,000  
years**

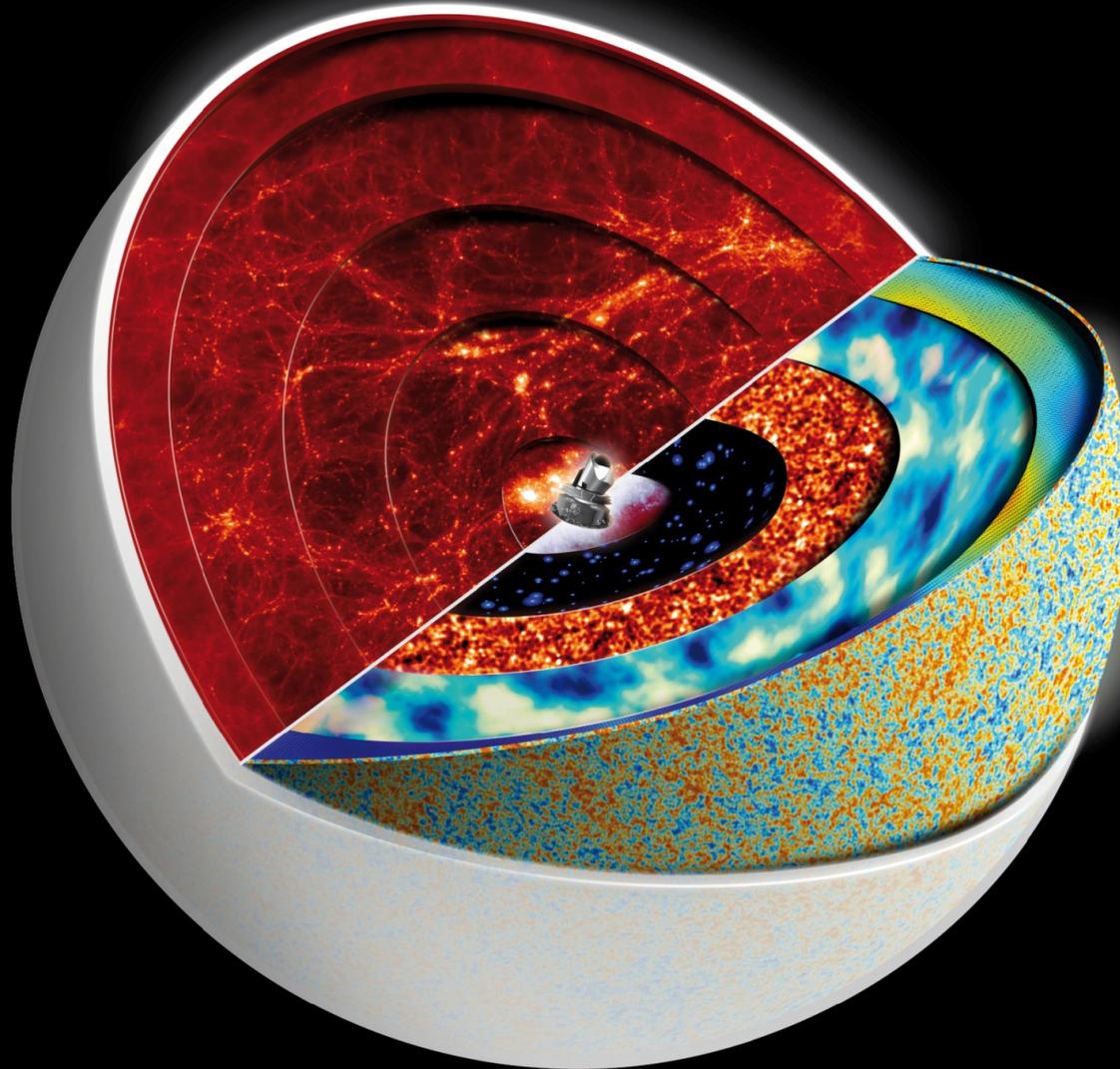
**present  
day**

**$\sim 200$  million  
years**

**13.7 billion  
years**

# Cosmogénèse

L'Univers visible est un onion 😊



De la mousse quantique à l'éponge cosmique...



# PLANCK

Une mission scientifique de l'Agence spatiale Européenne

Sélectionnée sur concours en 1996

Pour mesurer la carte définitive des anisotropies de  
température cosmiques

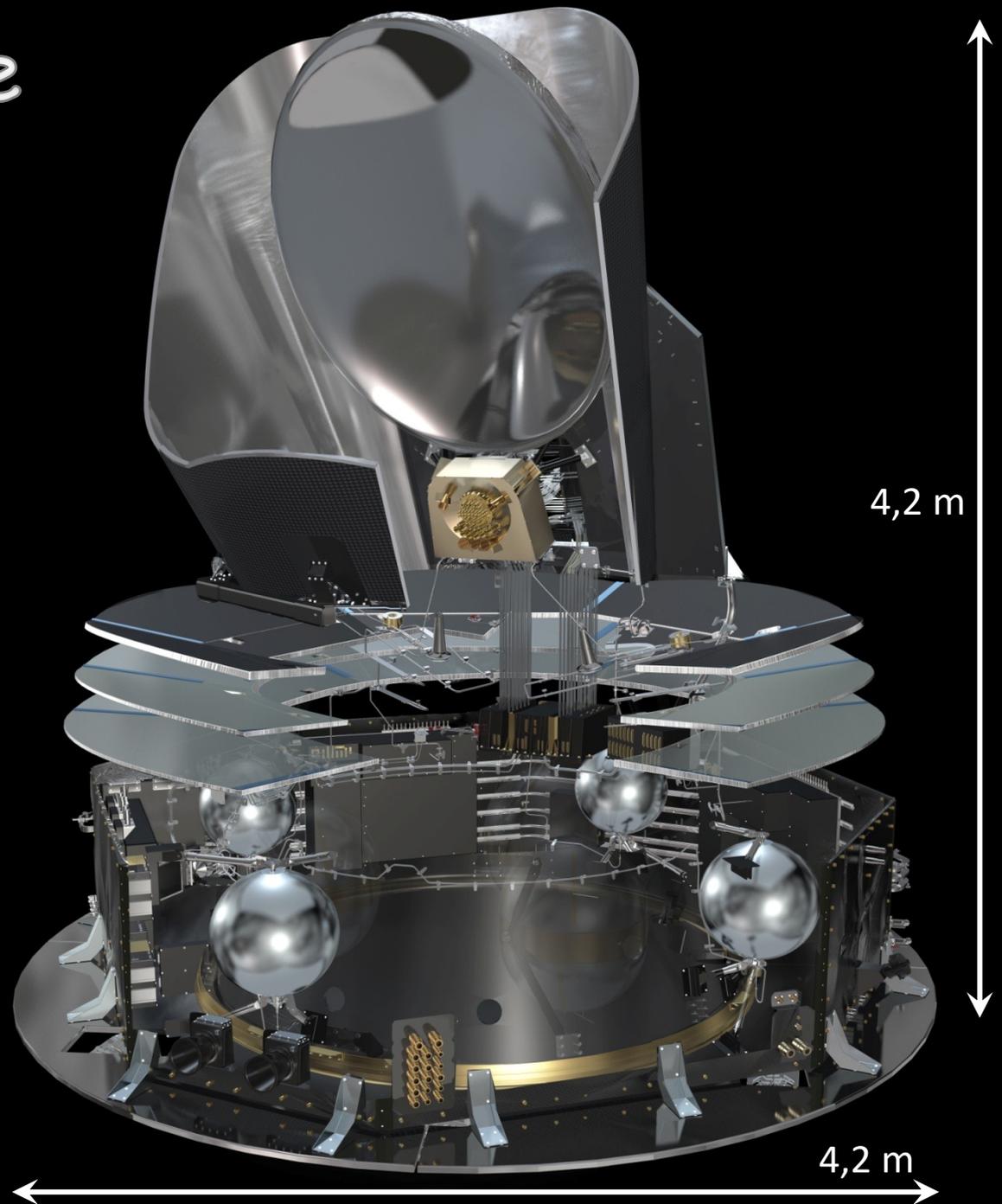
En repoussant les limites des technologies établies

# Planck en coupe

1912 Kg  
1600 W consommation  
2 instruments - HFI & LFI  
15 mois de relevé nominal  
( $\geq 2$  mesures en tout point)

50 000 composants  
électroniques  
36 000 l  $^4\text{He}$   
12 000 l  $^3\text{He}$   
11 400 documents  
20 ans entre le 1er projet et les  
premiers résultats (2013)

6c/an par Européen  
16 pays  
400 chercheurs / 1000





planck



DTU Space  
National Space Institute



Science & Technology  
Facilities Council



HFI PLANCK



National Research Council of Italy



CSIC



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.



UK SPACE  
AGENCY



WUFI



UNIVERSITY OF  
CAMBRIDGE



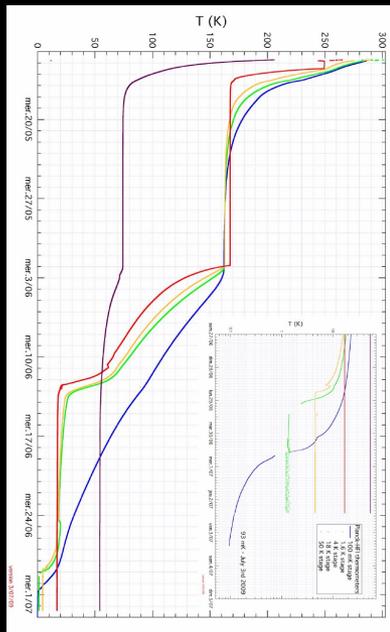
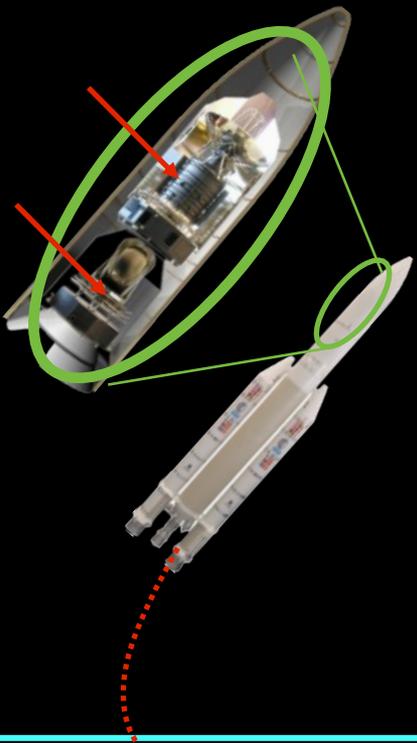


DUSTING IT OFF...

AFTER 16 YEARS  
OF HOPES & WORK



**Ariane 5 ECA Launch • HERSCHEL – PLANCK** - *May 14, 2009*





# A la Cave de l'IAP...

+ CC/CINECA/  
Darwin/NERSC...

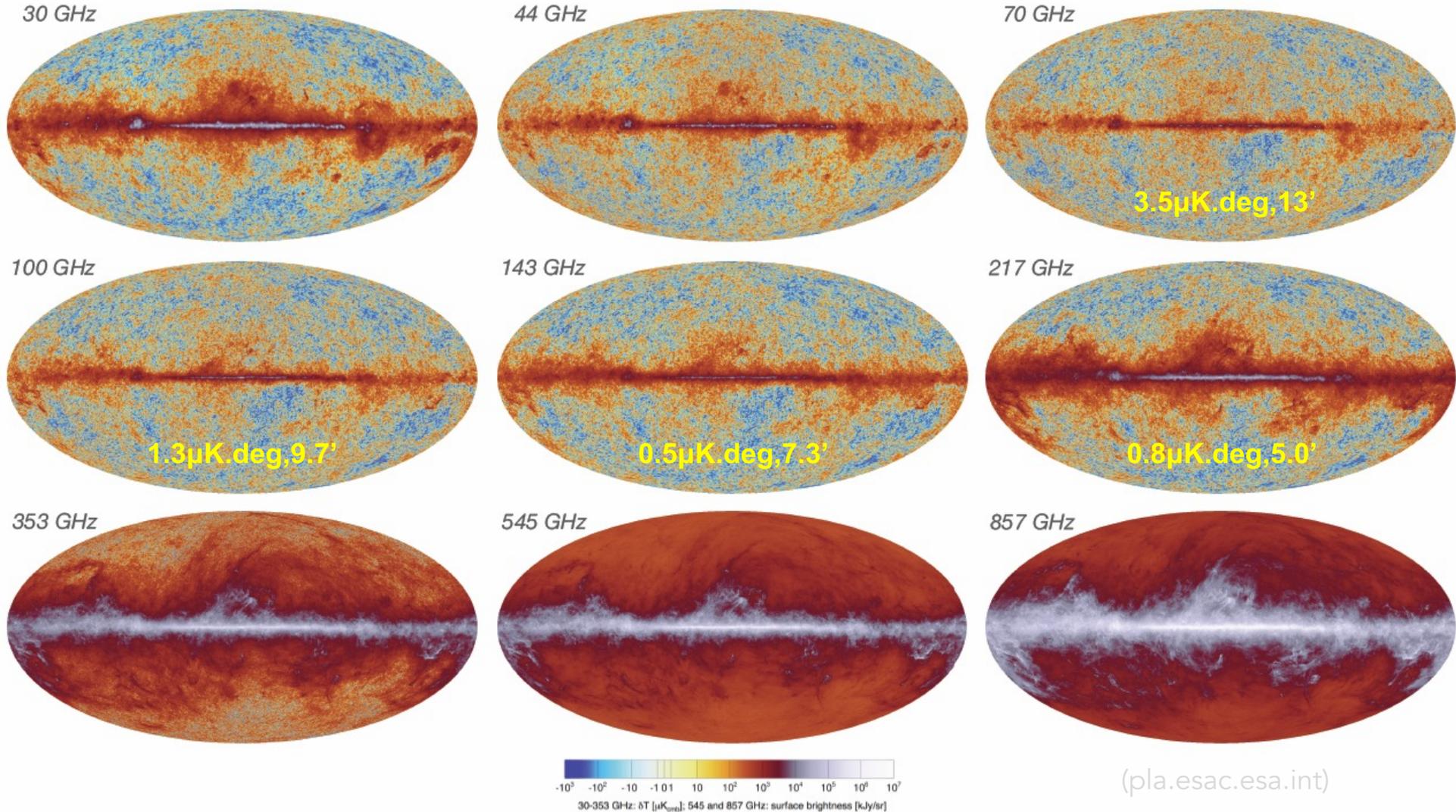
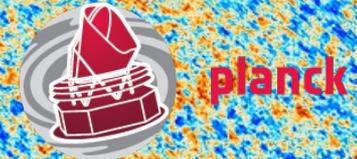


Pour traiter ~  
1000 milliards  
d'échantillons  
temporels

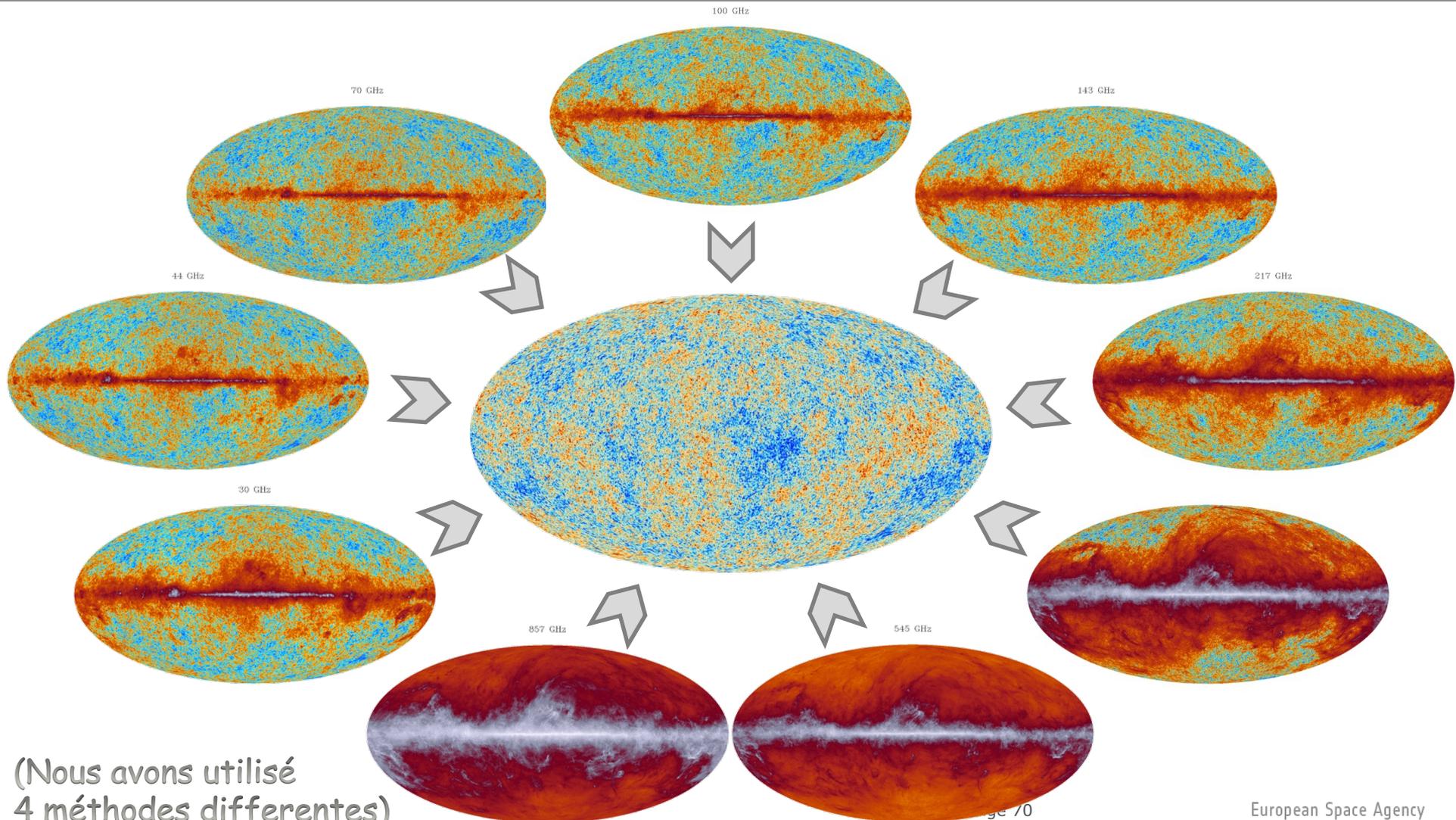
# Institut d'astrophysique de Paris



# Planck 2018 Intensity maps



# L'enlèvement des voiles du fond



(Nous avons utilisé  
4 méthodes différentes)

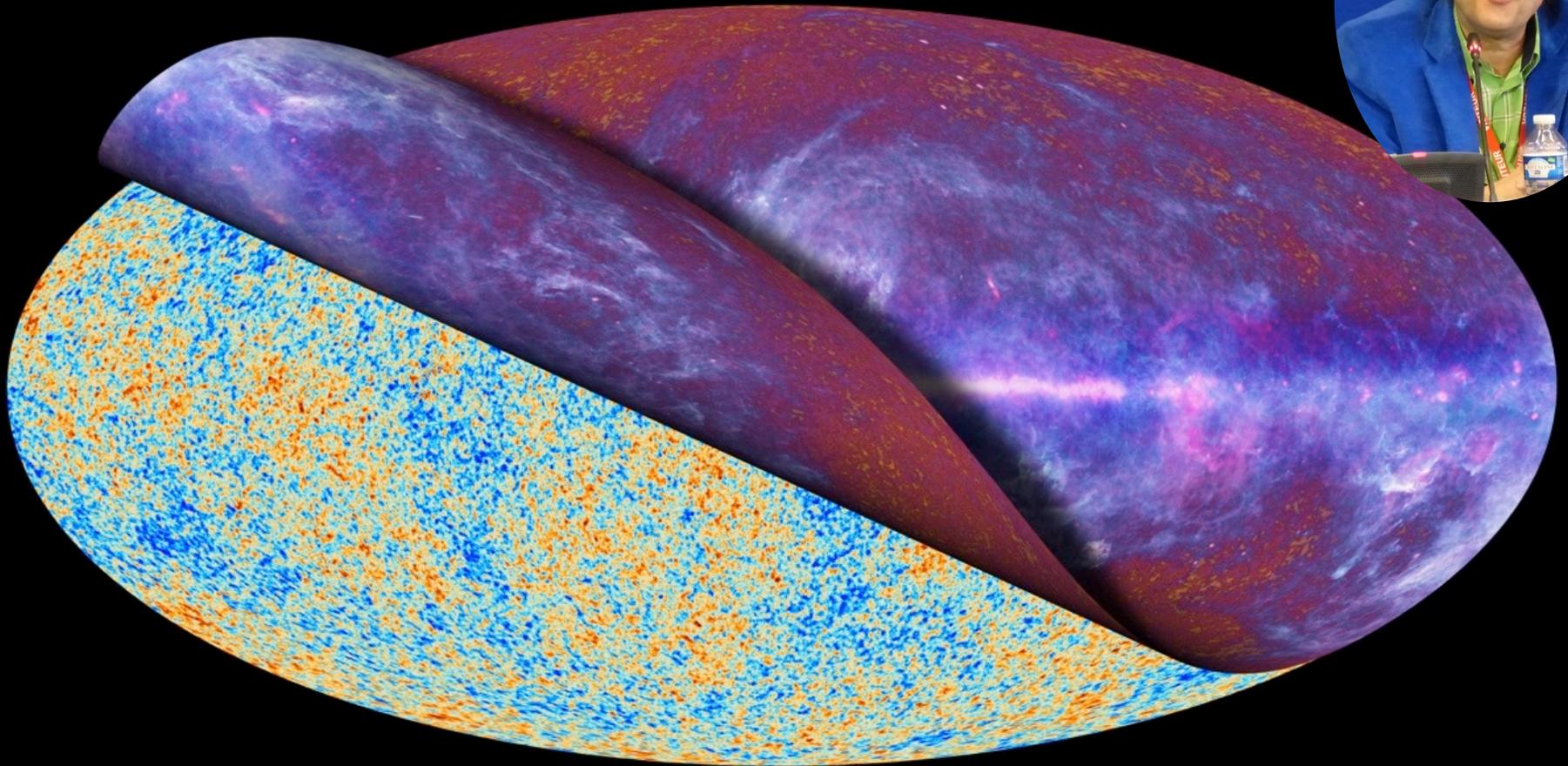
"Réponses et questions cosmologiques"

page 70

European Space Agency

3% of the CMB sky replaced by a Gaussian Random realisation

Paris, 21 Mars 2013



# Planck unveils the Cosmic Microwave Background



Entrevue papale du 12 mai 2017

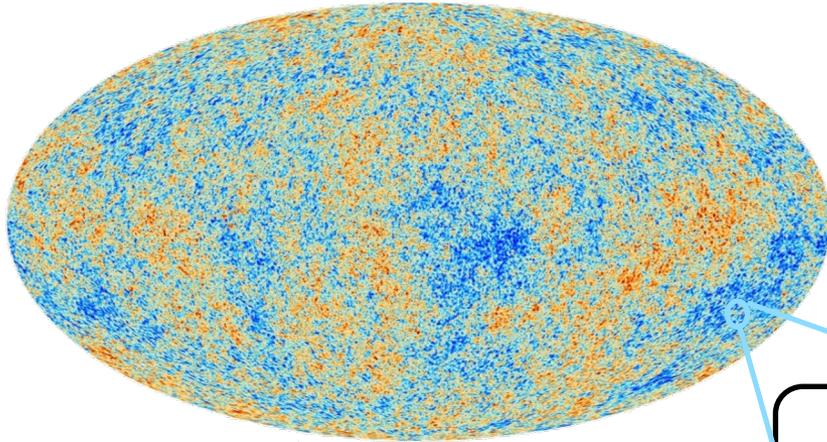


Lemaitre Conference @ Castel Gandolfo

# Ce qu'en dit la théorie...

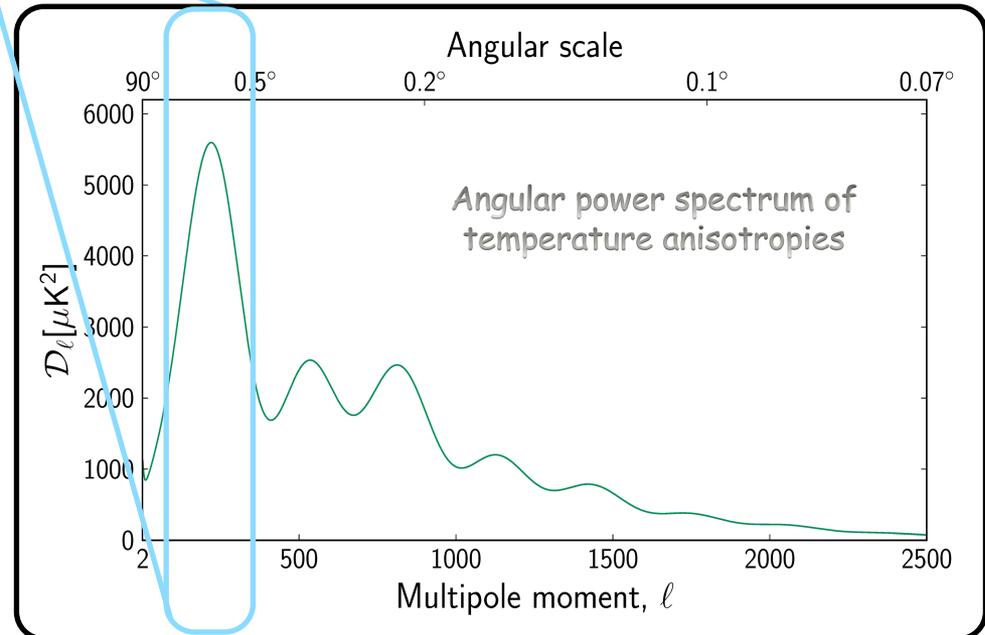


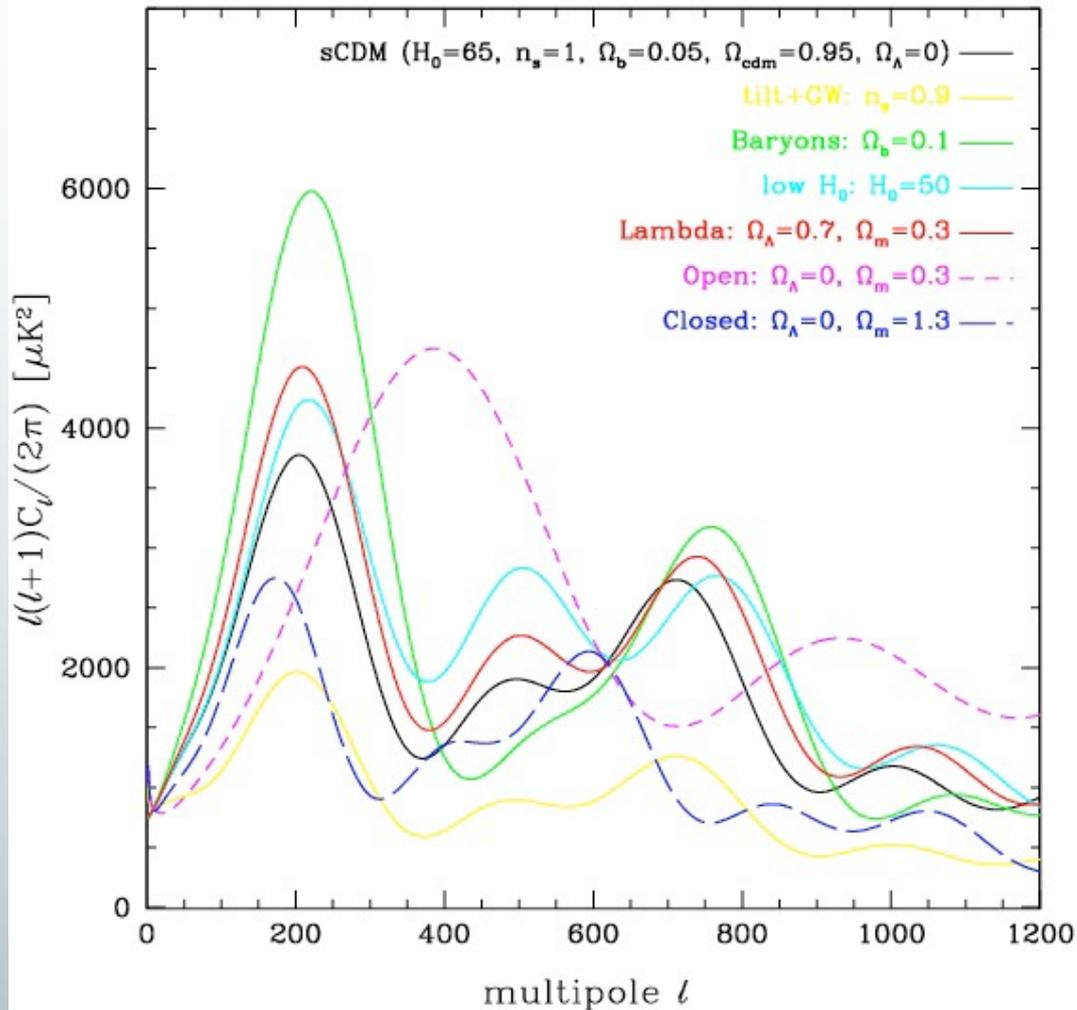
## (bien avant les observations...)



On ne peut prédire la carte des anisotropies, telle que nous l'observons...

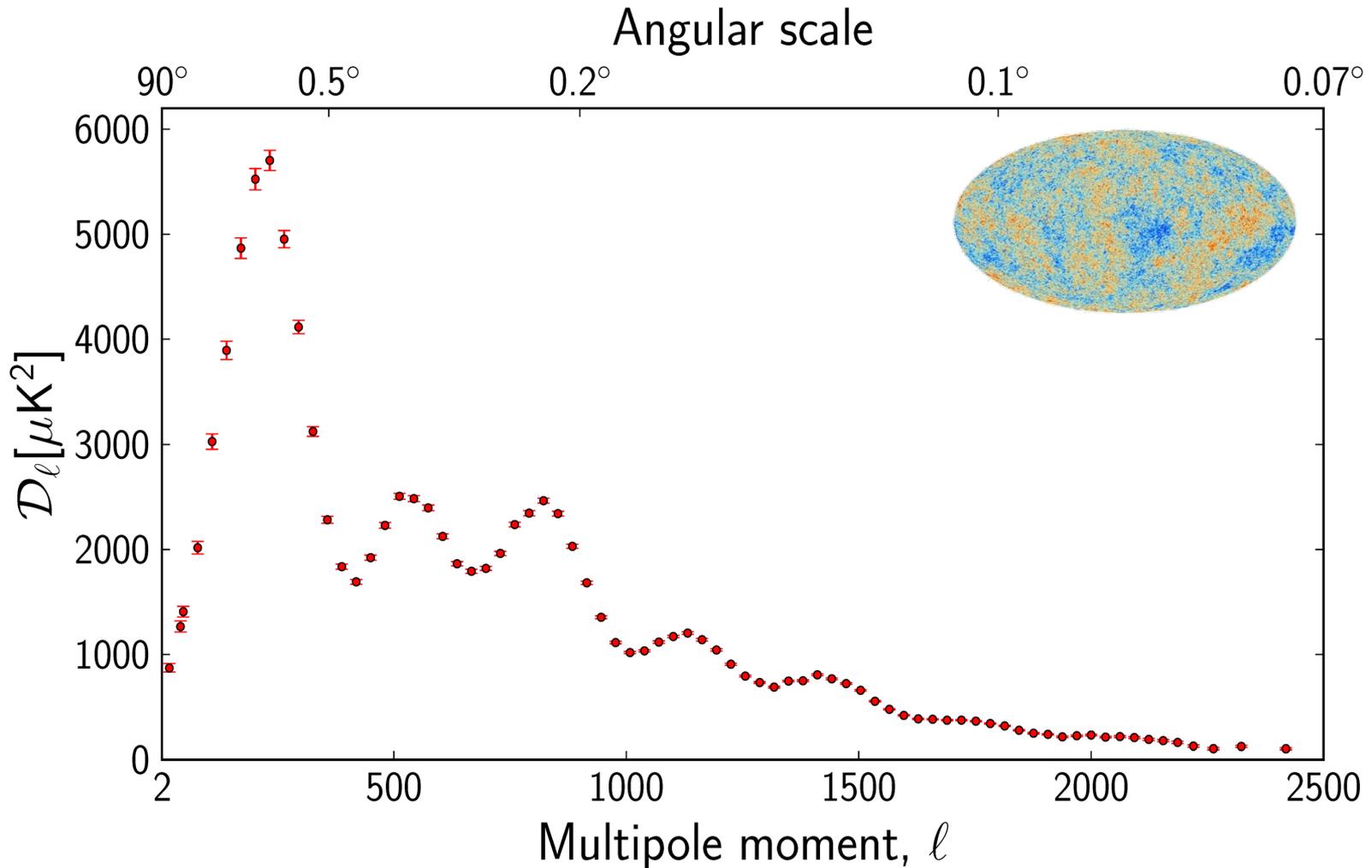
Mais on peut prédire ses propriétés statistiques !  
(comme par exemple la hauteur typique des vagues en fonction de leur distance crête à crête)

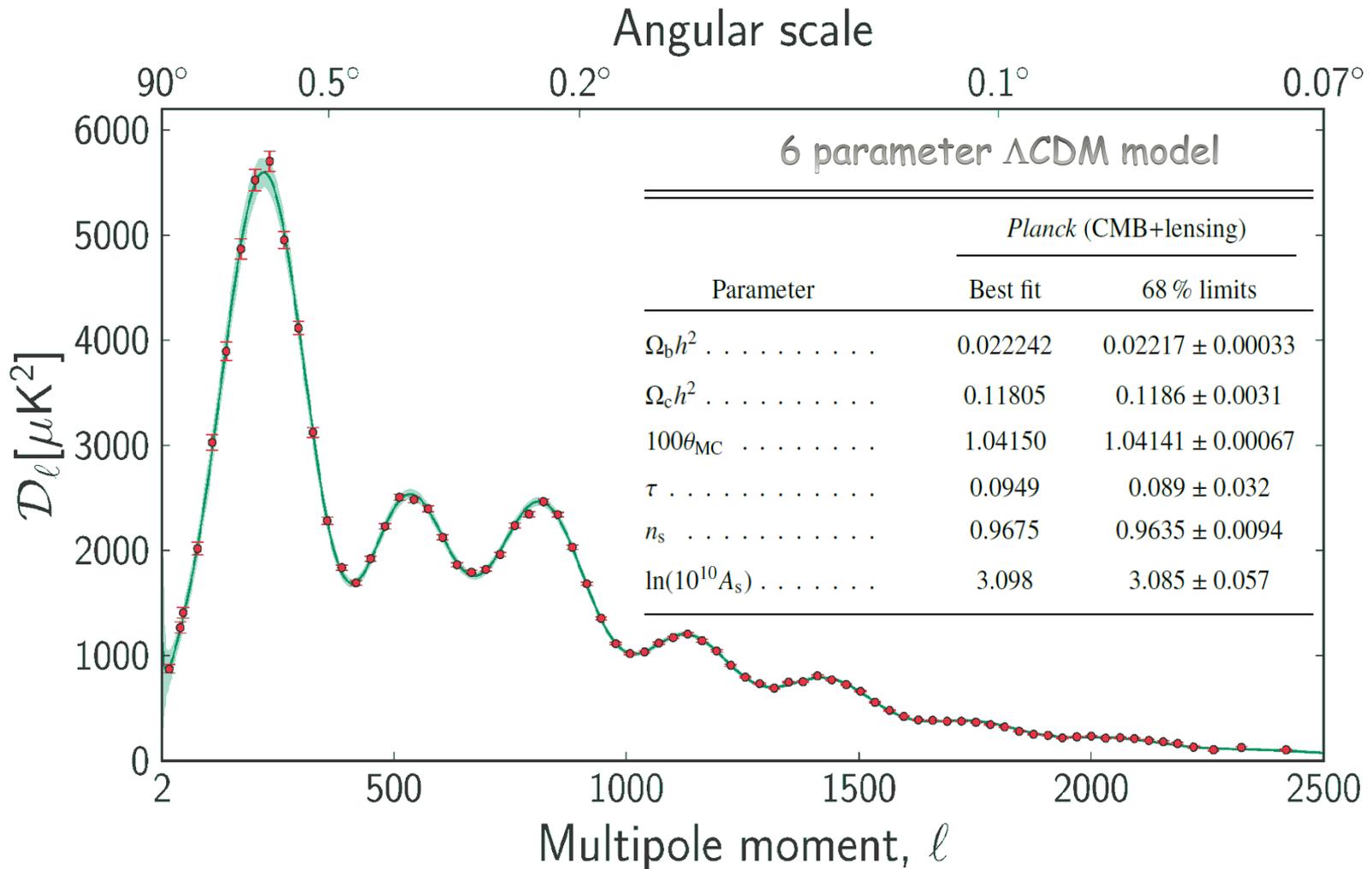




Peebles, Yu, Sachs & Wolf, Sunyaev, Zeldovich, Silk, Vittorio, Wilson, Mukhanov, Chibisov, Bardeen, Linde, Bond, Efstathiou, Bouchet, Bennett, Gott, Kaiser, Stebbins, Allen, Shellard, Seljack, Zaldariaga, Kamionkowski, Hu, ...

# Le spectre de Puissance des anisotropies de température mesuré par Planck





- ~ 900 milliards d'échantillons dans ~100 flots temporels
- 9 cartes de ~50 million de pixels chacune (23 avec Polar.)
- 1 carte du cmb de ~50 million pixels (+celles P)
- 2 million de modes harmoniques ( $2l+1$  m-modes par  $l$ )
- Ajustés avec seulement 6 paramètres!
- *Sans nécessité d'un 7<sup>eme</sup>...*

# COMPOSITION De L'UNIVERS

TEMPS

aujourd'hui

**Inflation**  
(pendant le Big-Bang)

**AVANT PLANCK**

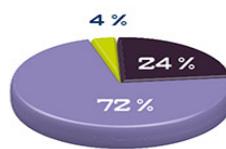
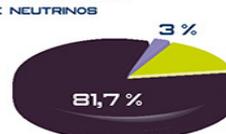
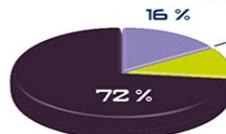
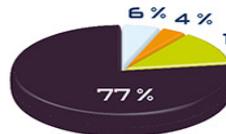
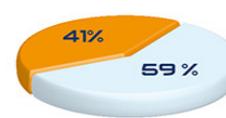
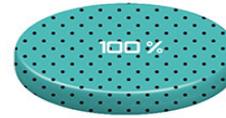
**AVEC PLANCK**

**3 minutes**  
après le Big-Bang

**400 000 ans**  
après le Big-Bang

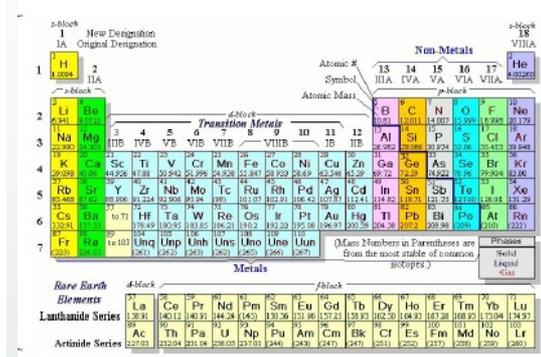
**2 milliards d'années**  
après le Big-Bang

**Dans 10 milliards d'années**



■ Inflation   
 ■ Rayonnement   
 ■ Neutrinos   
 ■ Matière ordinaire   
 ■ Matière sombre   
 ■ Energie sombre

Nous  
(et tous les éléments)  
ne sommes qu'une toute  
petite minorité de  
l'Univers, ~5%...

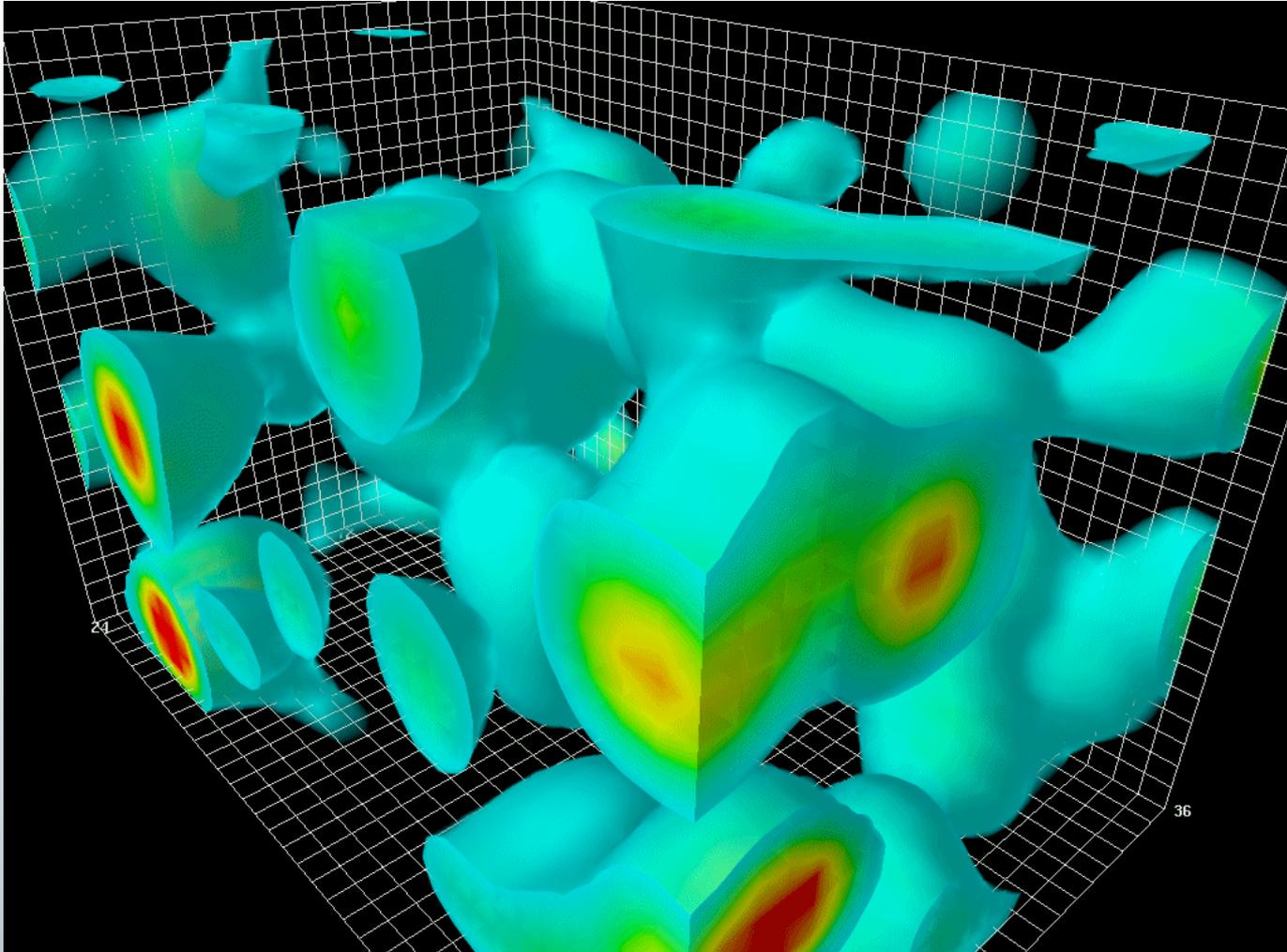


*Et on ne sait pas grand chose sur les 95% restants...  
(Mais c'est quand même mieux que de ne se douter de rien)*

En route vers le grand froid?

# Enfants du vide...

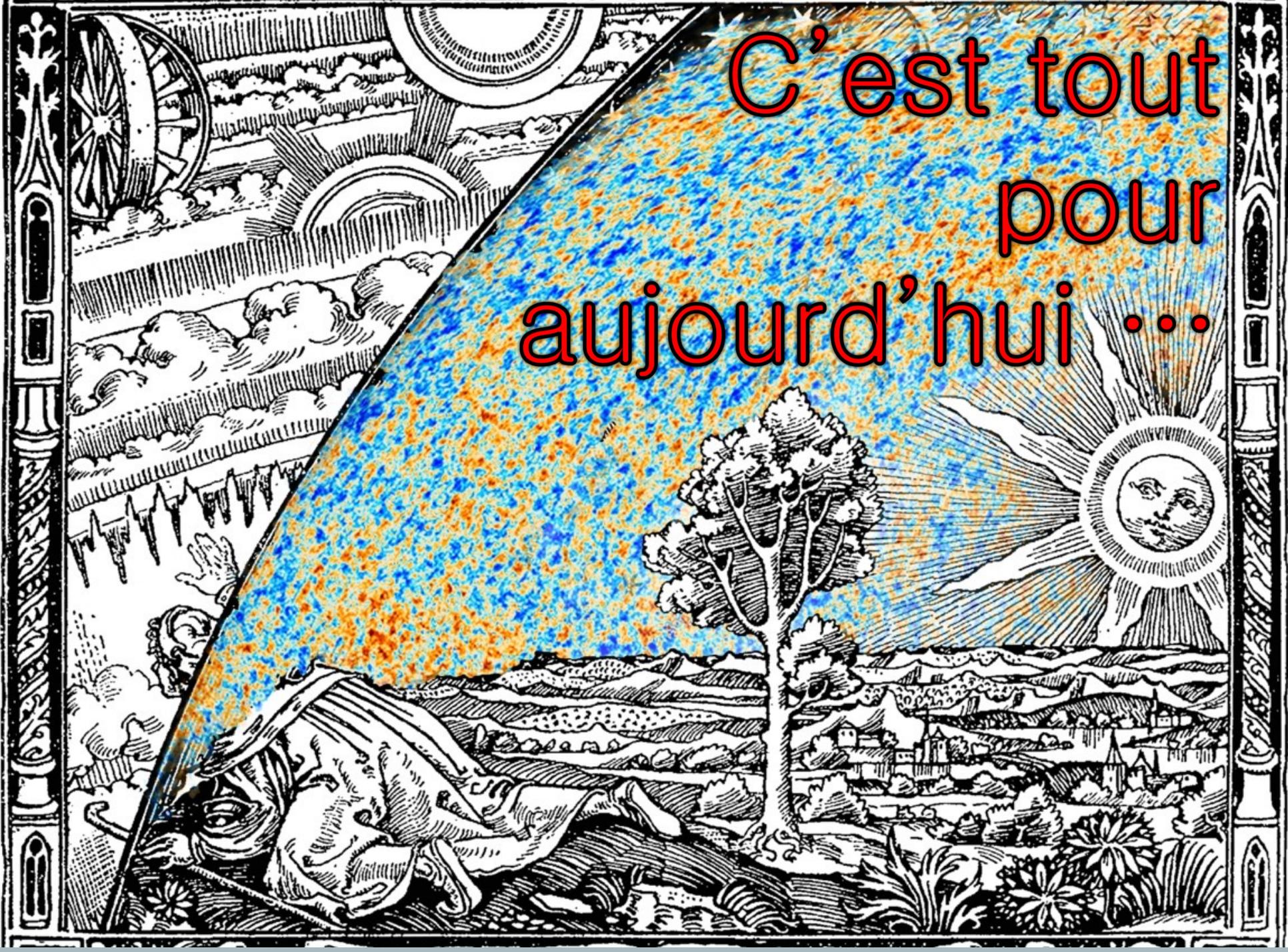
Le vide (quantique) primordial est le siège de fluctuations irrépressibles



Simulation QCD du Prof. Derek Leinweber

Ces fluctuations de densité d'énergie du vide vont initier la marche vers la complexité

C'est tout  
pour  
aujourd'hui ...



Mais la  
quête  
continue !

