

# Cosmologie Moderne

## Cours 4



J.-Ch. Hamilton, APC  
hamilton@apc.univ-paris7.fr

# L'expansion de l'Univers

- E. Hubble (1929)

- ★ Observations spectroscopiques au mont Wilson

- ★ Spectroscopie:

- Observations de la brillance d'un objet en fonction de sa longueur d'onde
- Donne en général des informations sur
  - sa nature (étoiles, galaxie, ...)
  - sa température
  - sa composition chimique

- ★ Ici il va pour la première fois comparer les spectres d'objets à des (grandes) distances différentes

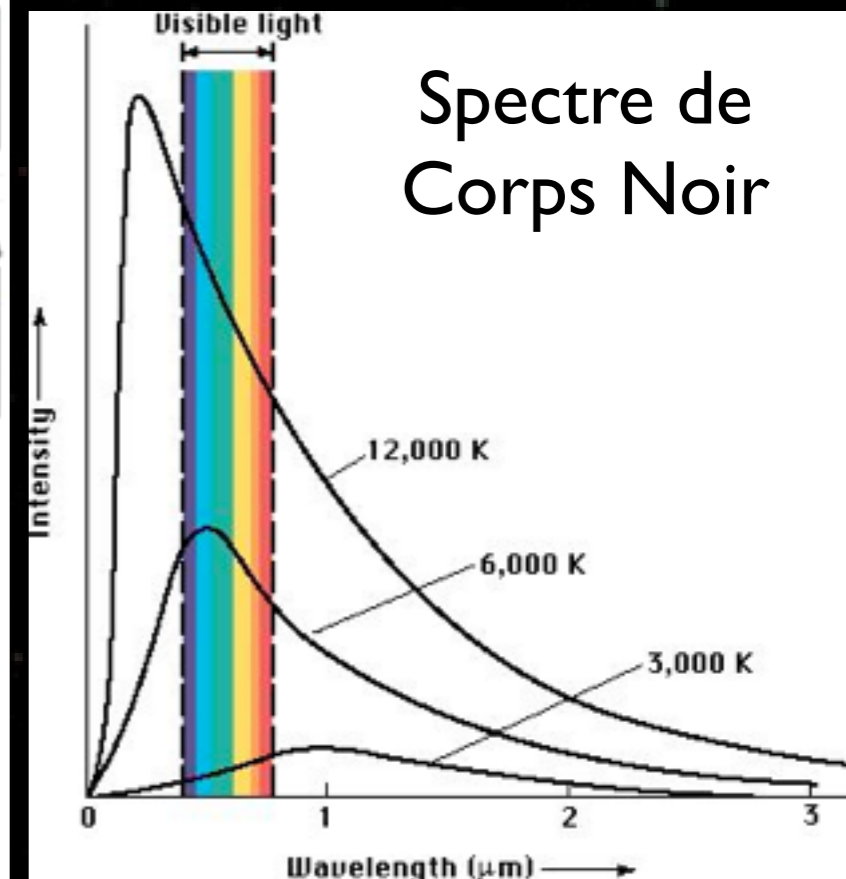
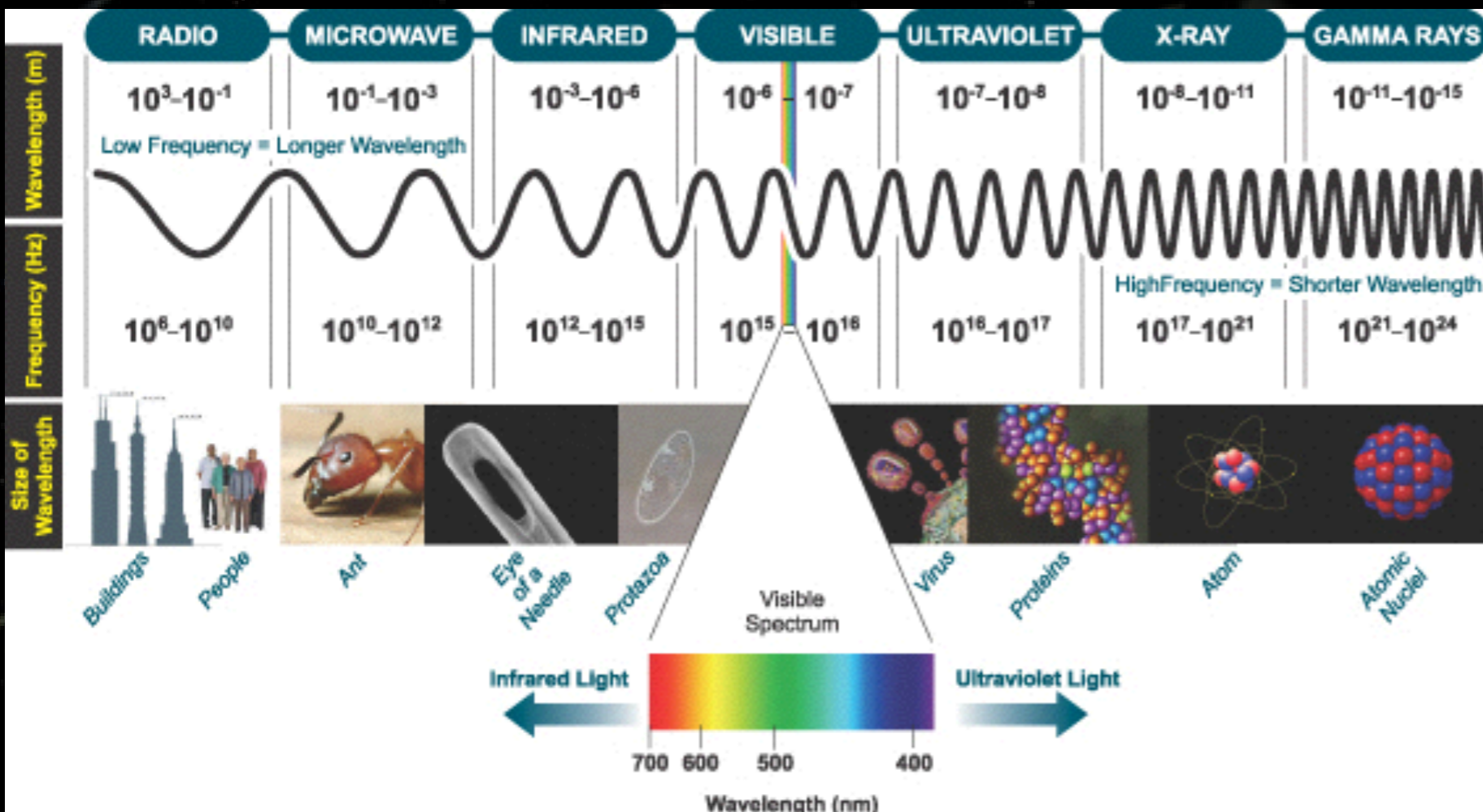
- ★ Il va trouver un résultat surprenant...



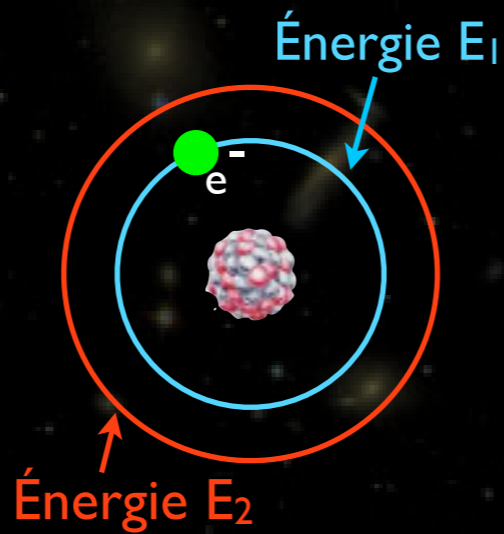
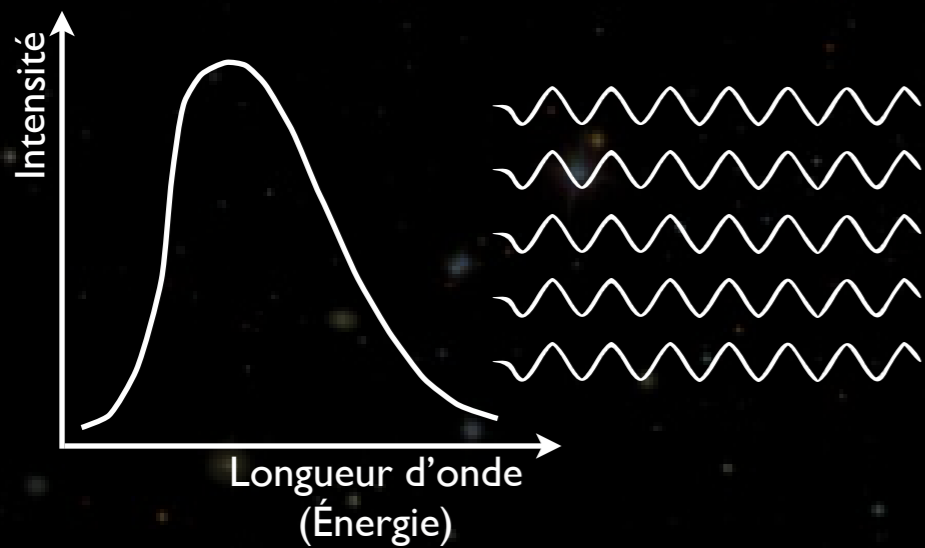
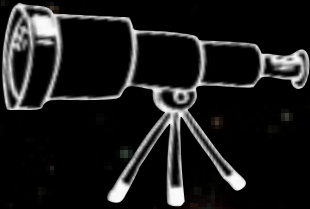
E. Hubble



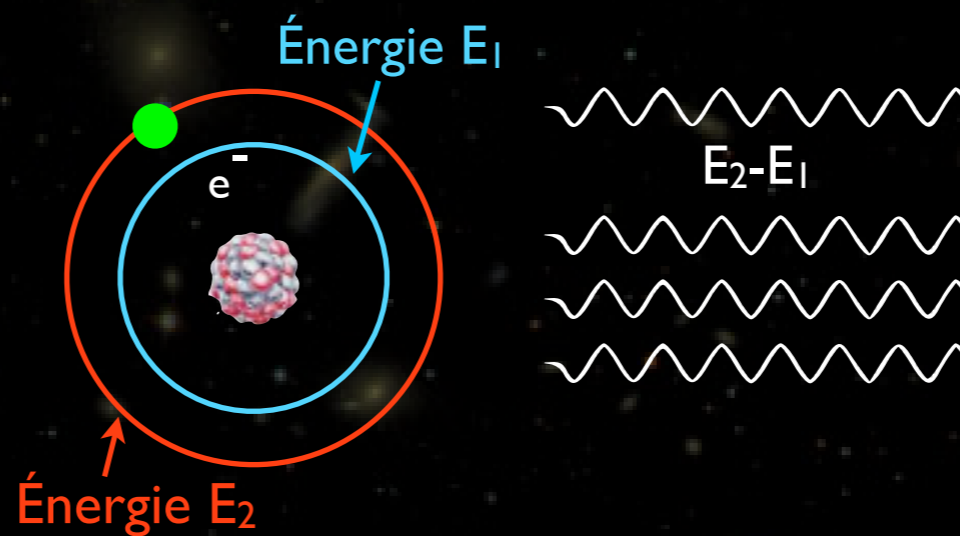
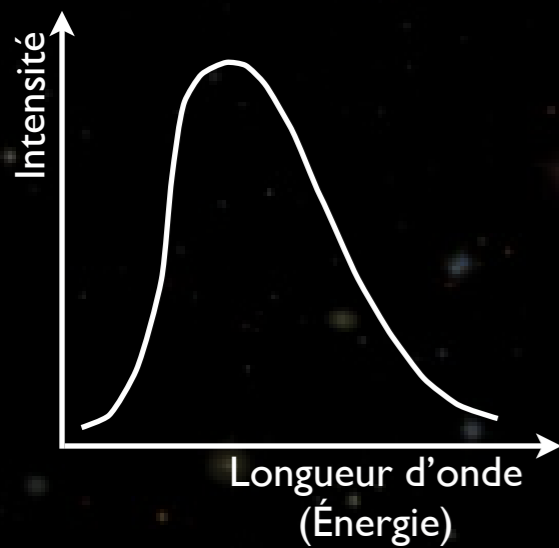
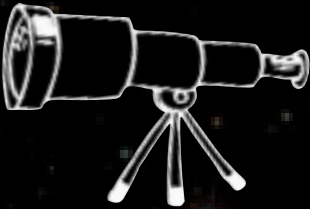
# Spectre électromagnétique



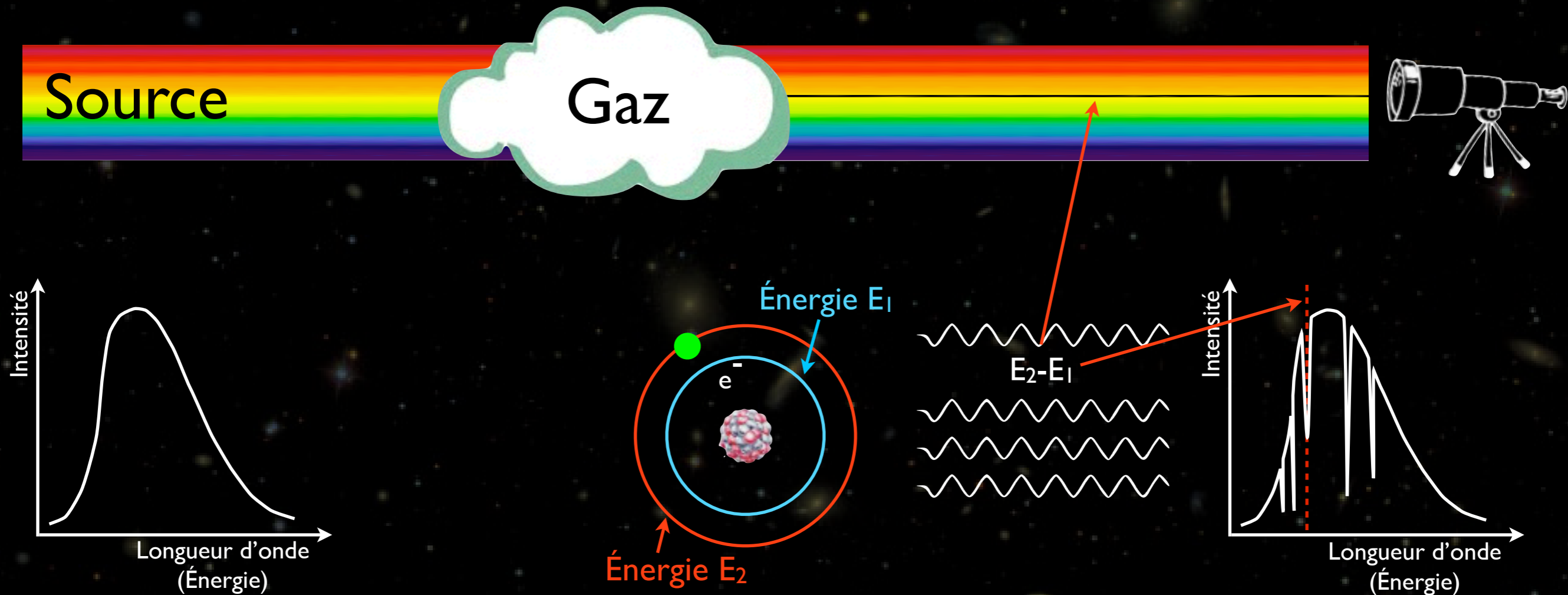
# Raies d'absorption/d'émission



# Raies d'absorption/d'émission



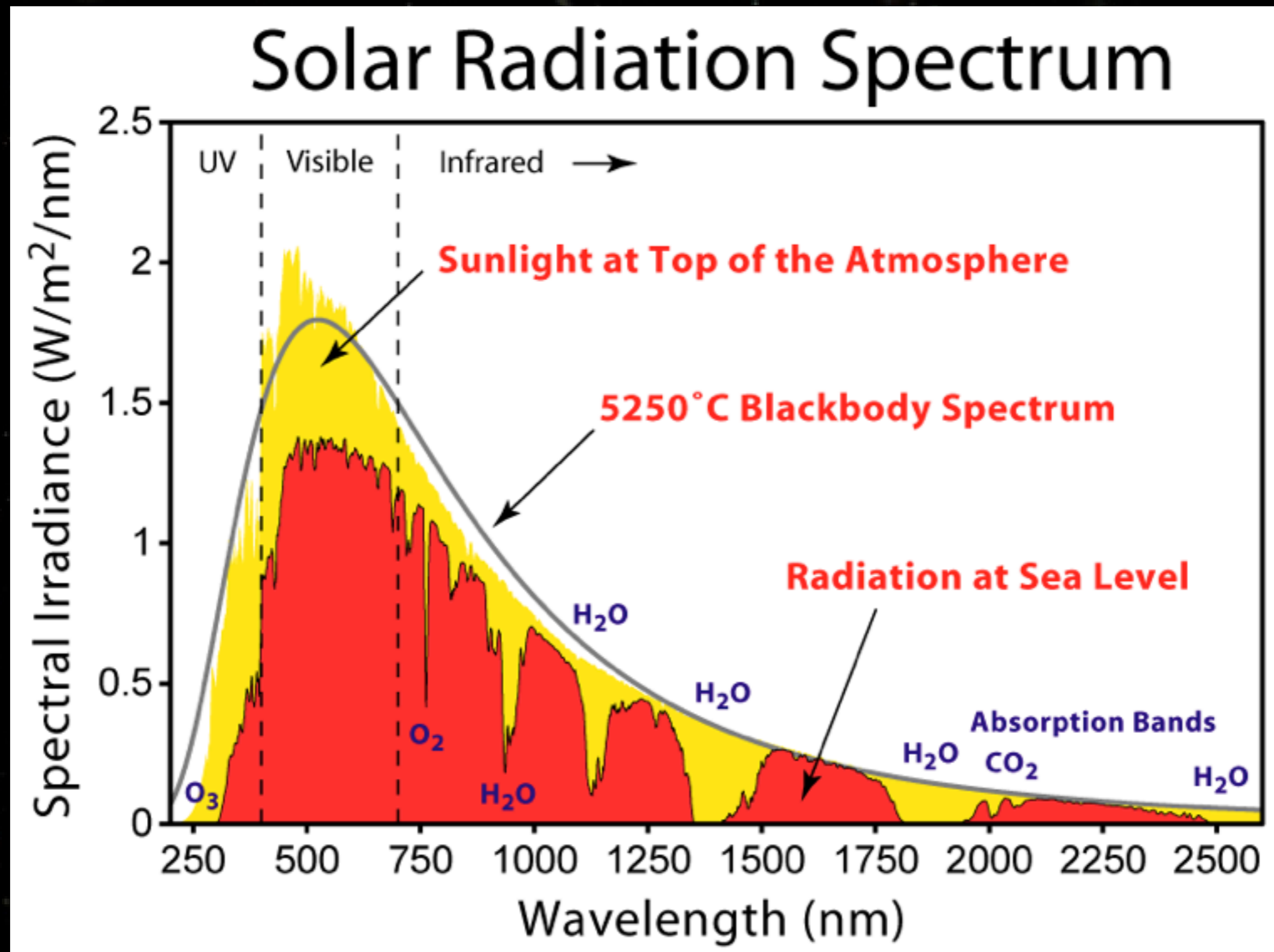
# Raies d'absorption/d'émission



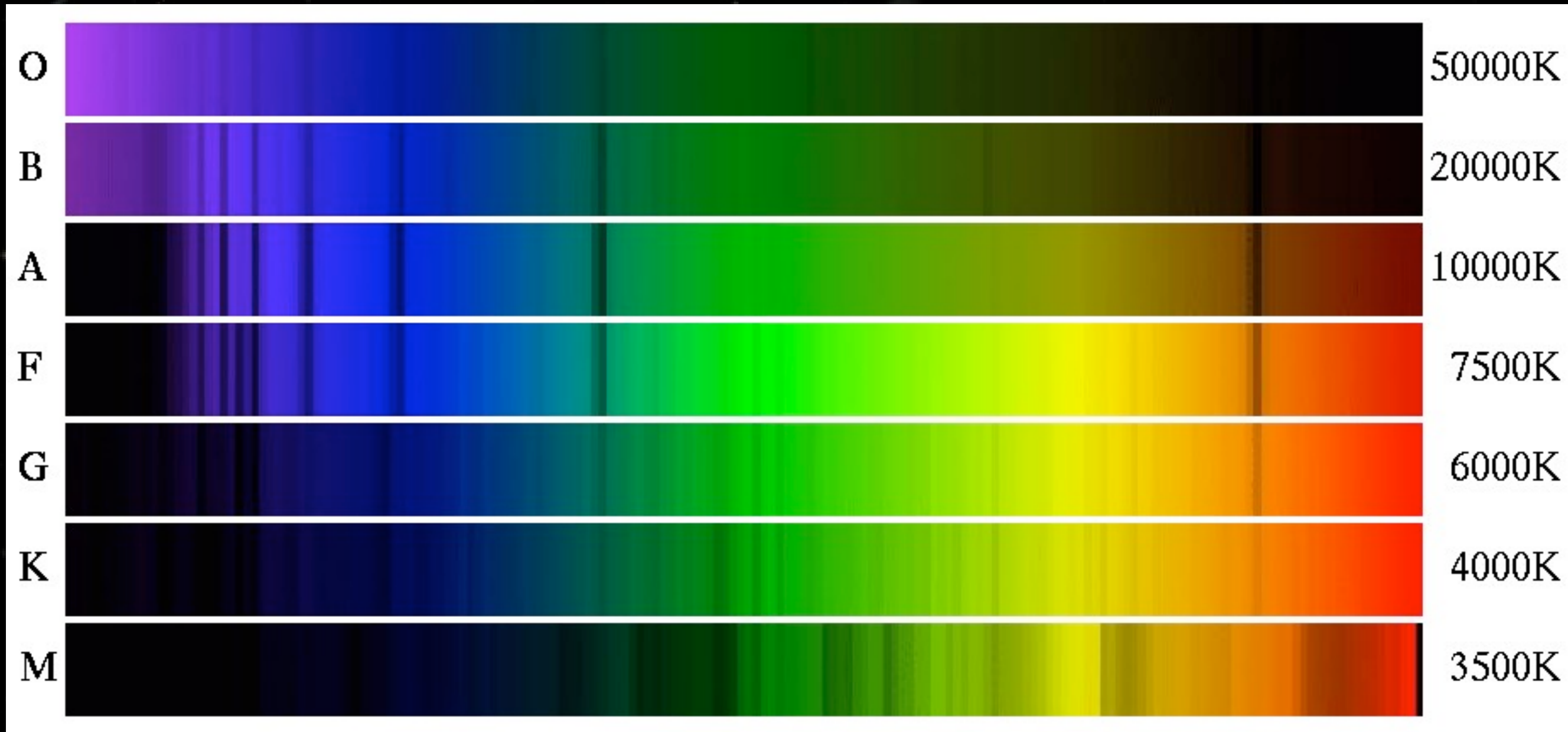
- La position des raies correspond à des transitions observées en laboratoire.
- On sait les reconnaître (doublets, triplets, ...)



# Spectre du Soleil



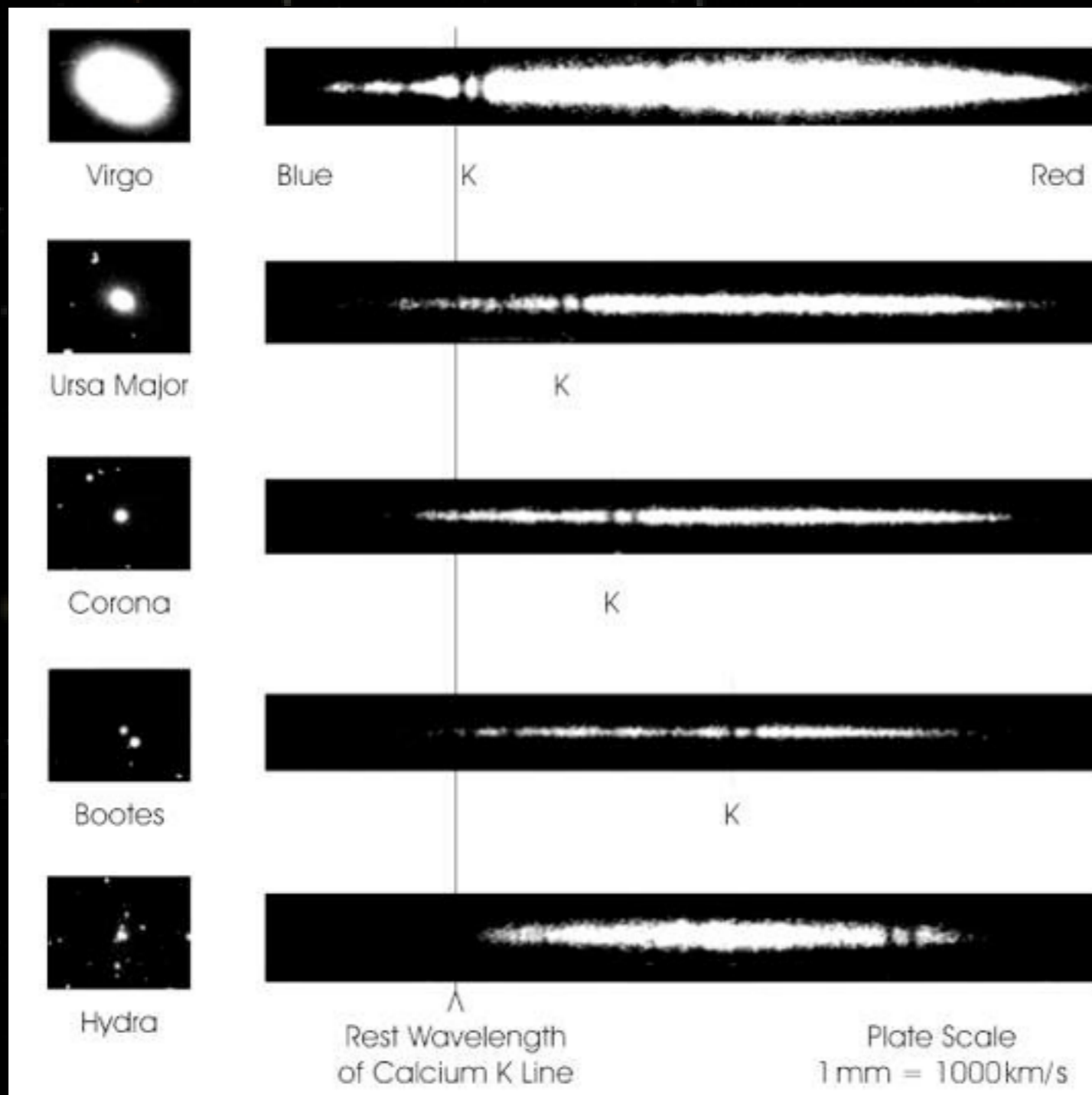
# Spectres d'étoiles





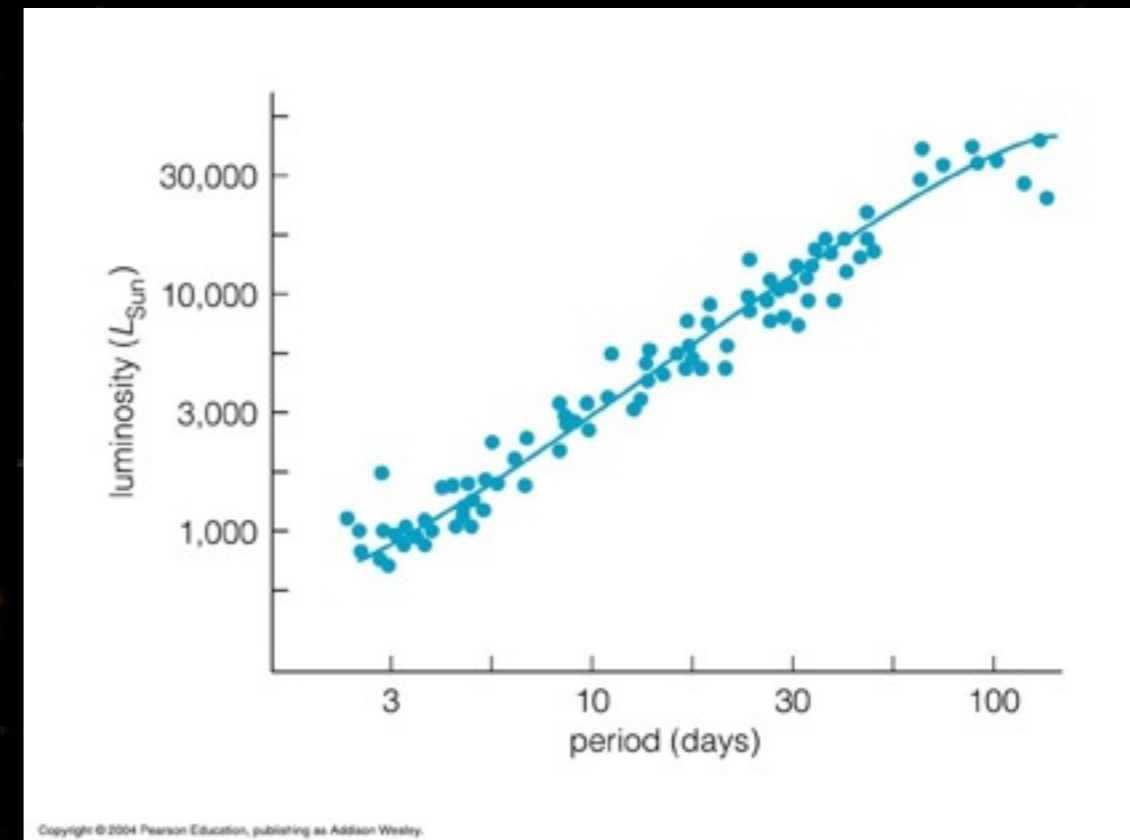
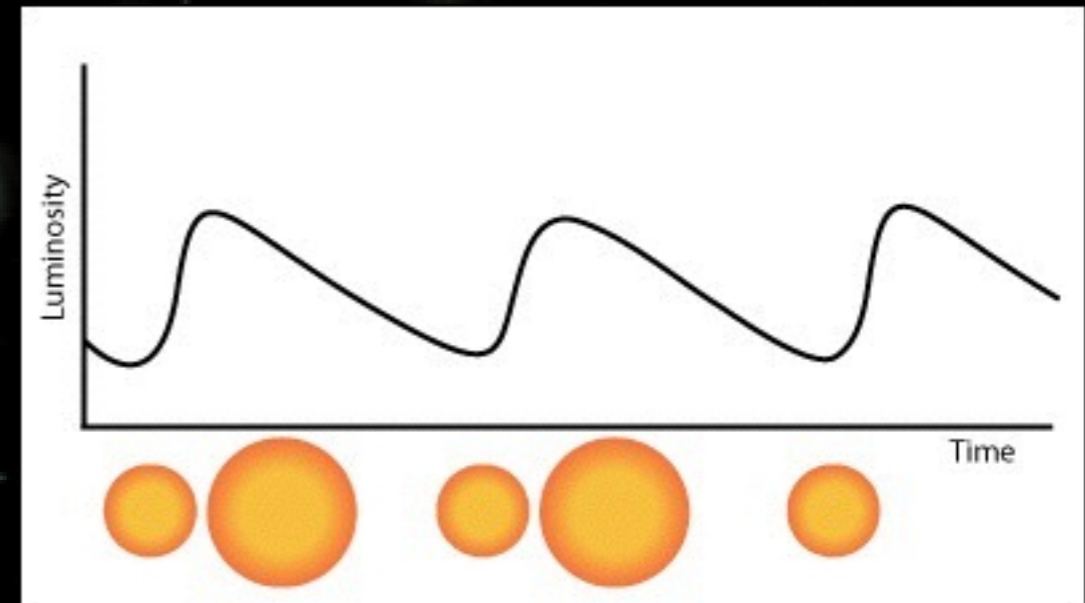
# L'Univers en expansion

- Hubble observe les raies de galaxies (1929):



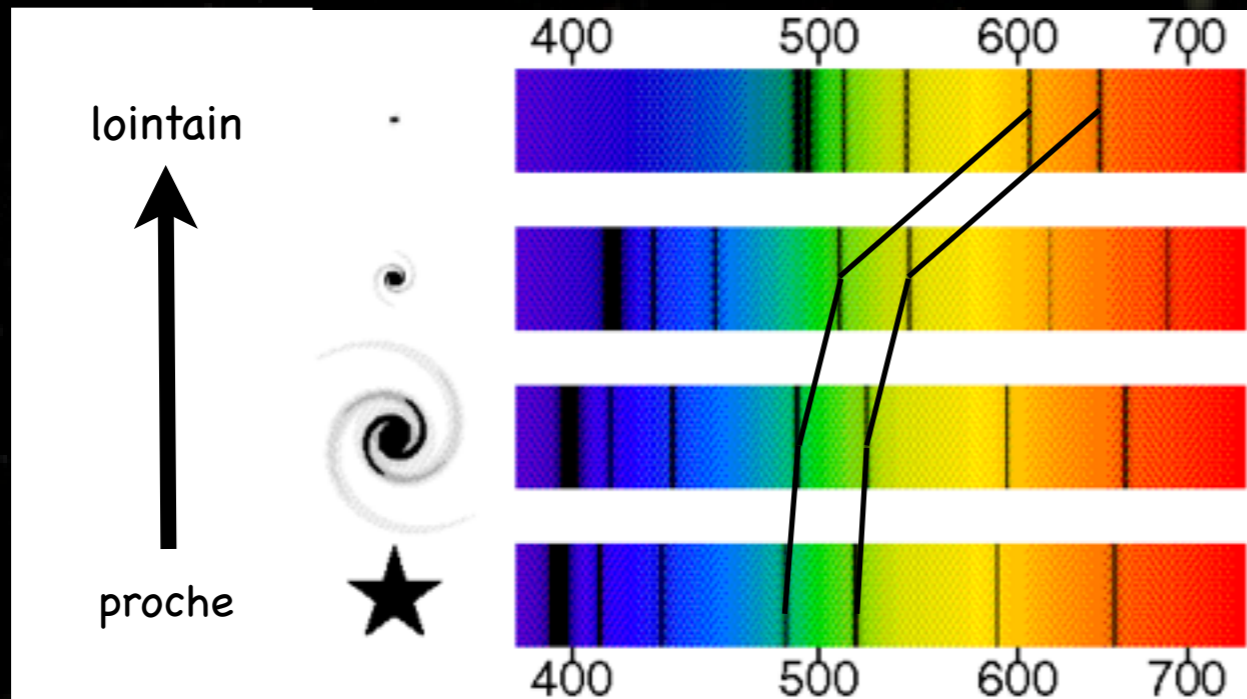
# Mesure de distance: céphéïdes

- Étoiles variables périodiques
- Très lumineuses
- Luminosité absolue reliée à la période
- Chandelles standard !!
- Mesure de distance de galaxies ~lointaines



# L'Univers en expansion

- Hubble observe les raies de galaxies (1929):
  - Le décalage vers le rouge des galaxies est proportionnel à leur distance



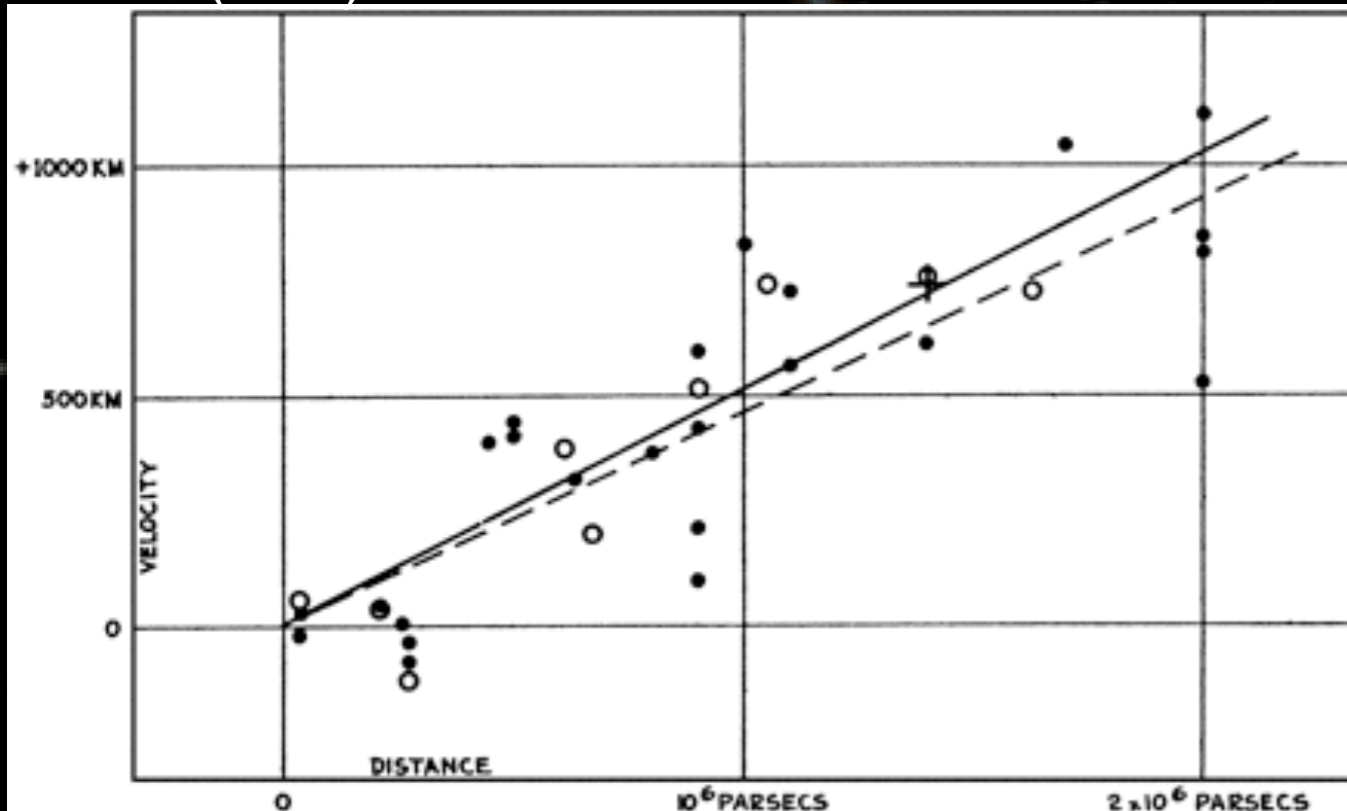
- Si ce décalage vers le rouge est interprété comme un effet Doppler :
  - La vitesse radiale des galaxies est proportionnelle à leur distance : loi de Hubble  $v = H_0 \times d$
- Explication naturelle dans le cadre de la R.G.



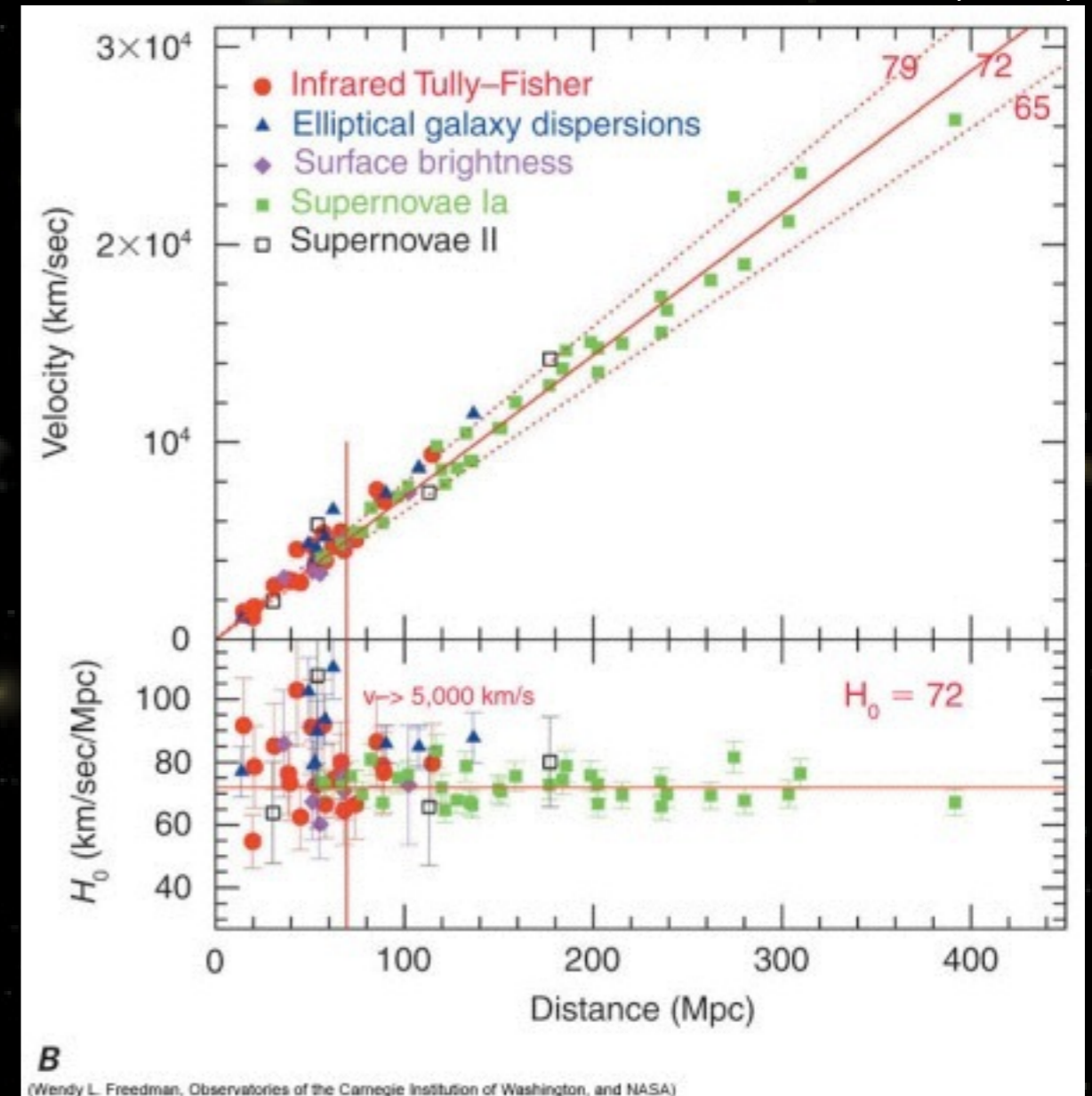
# La constante de Hubble

Freedman et al. (2001)

Hubble (1929)



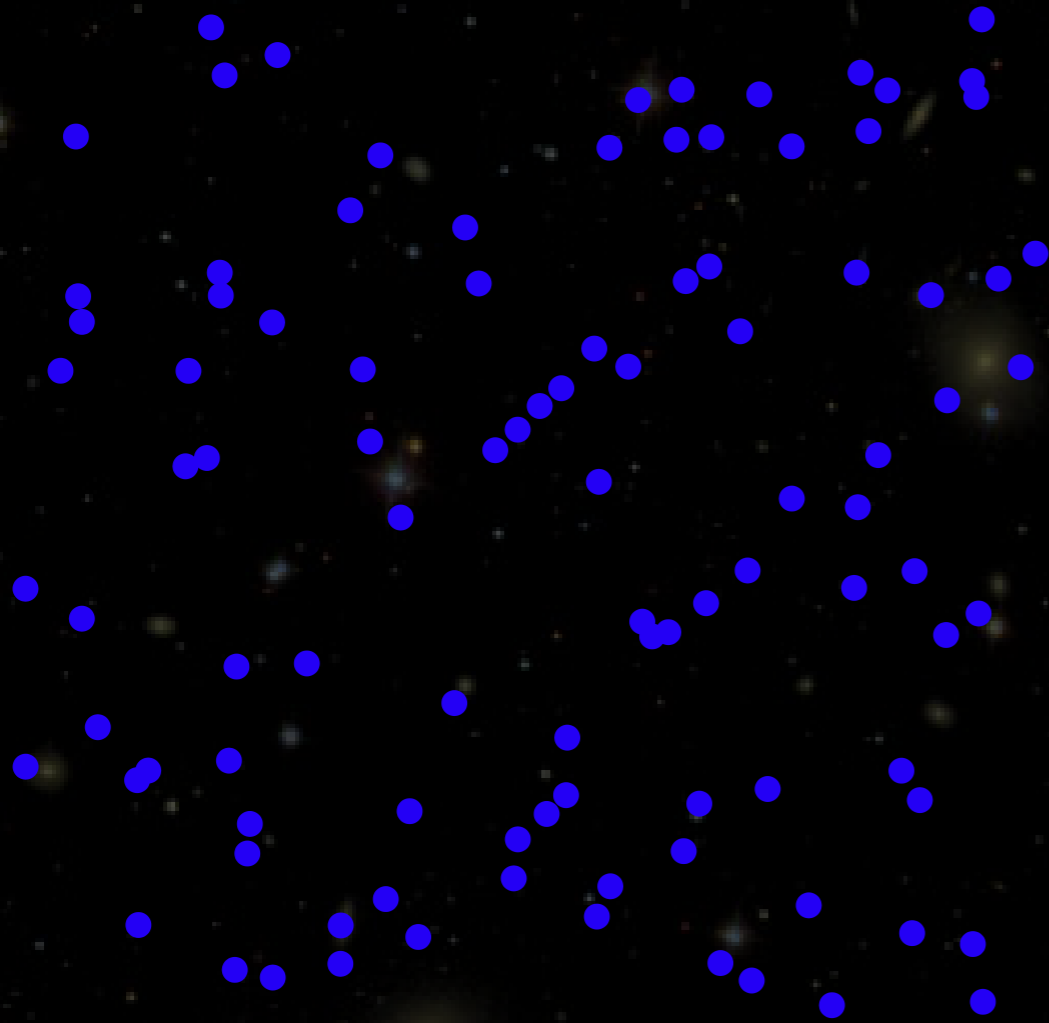
$H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$



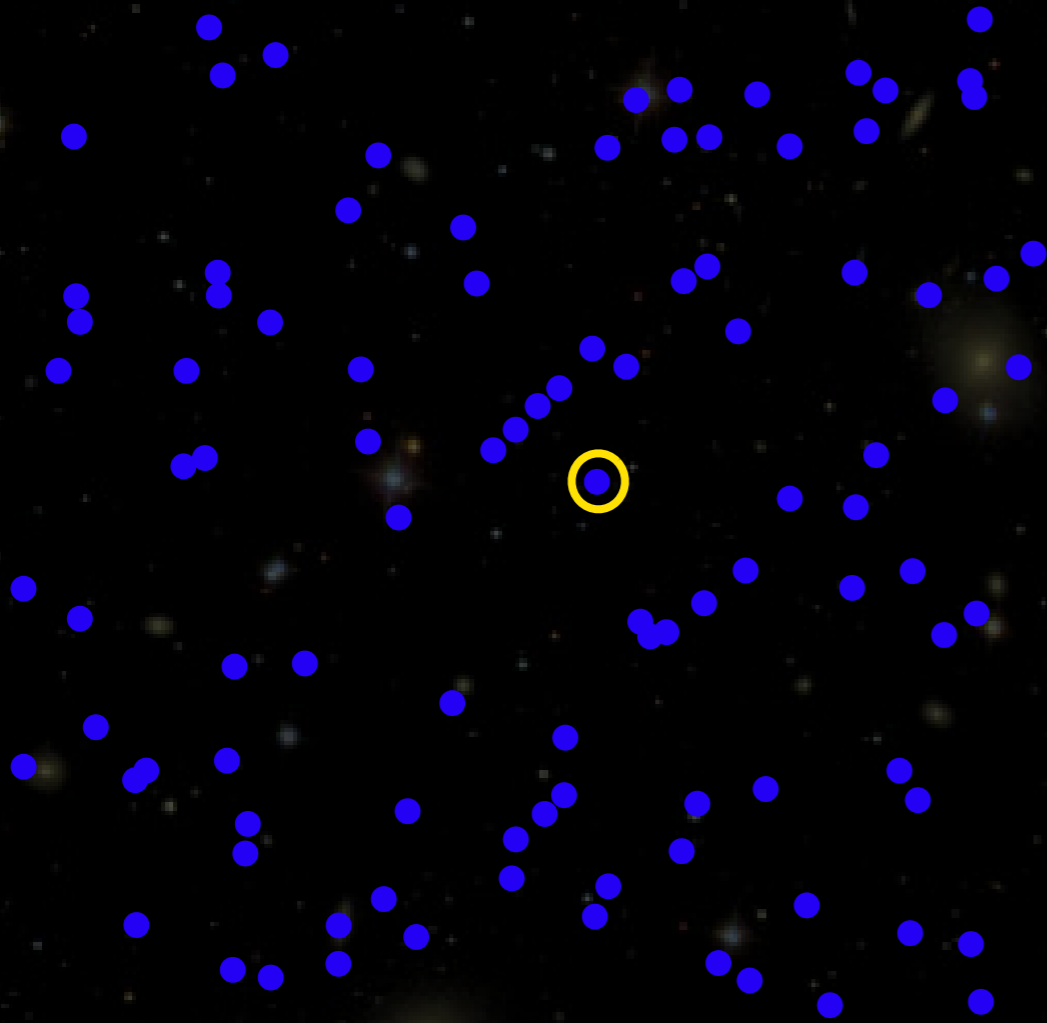
$H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$



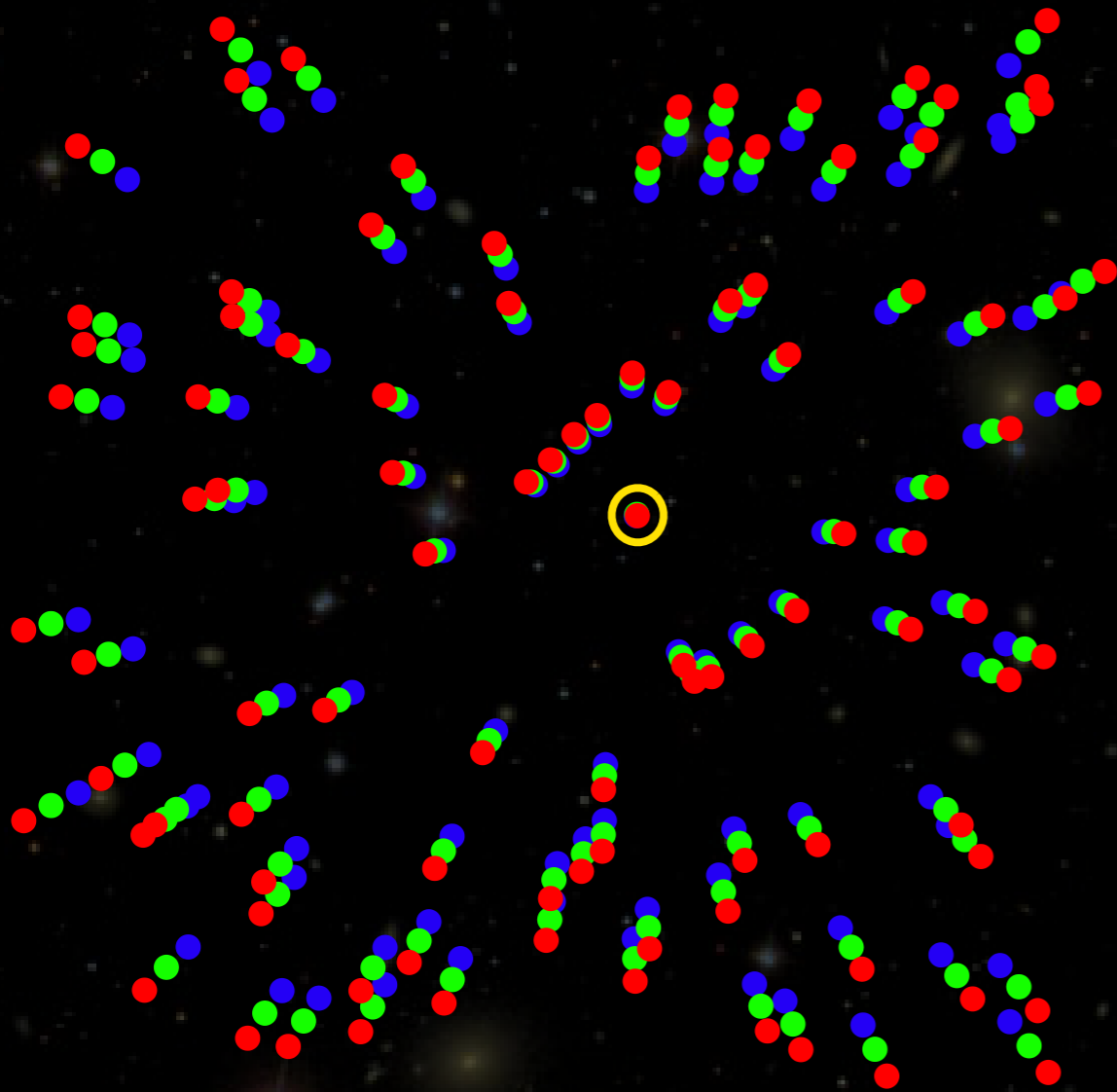
# L'expansion est globale



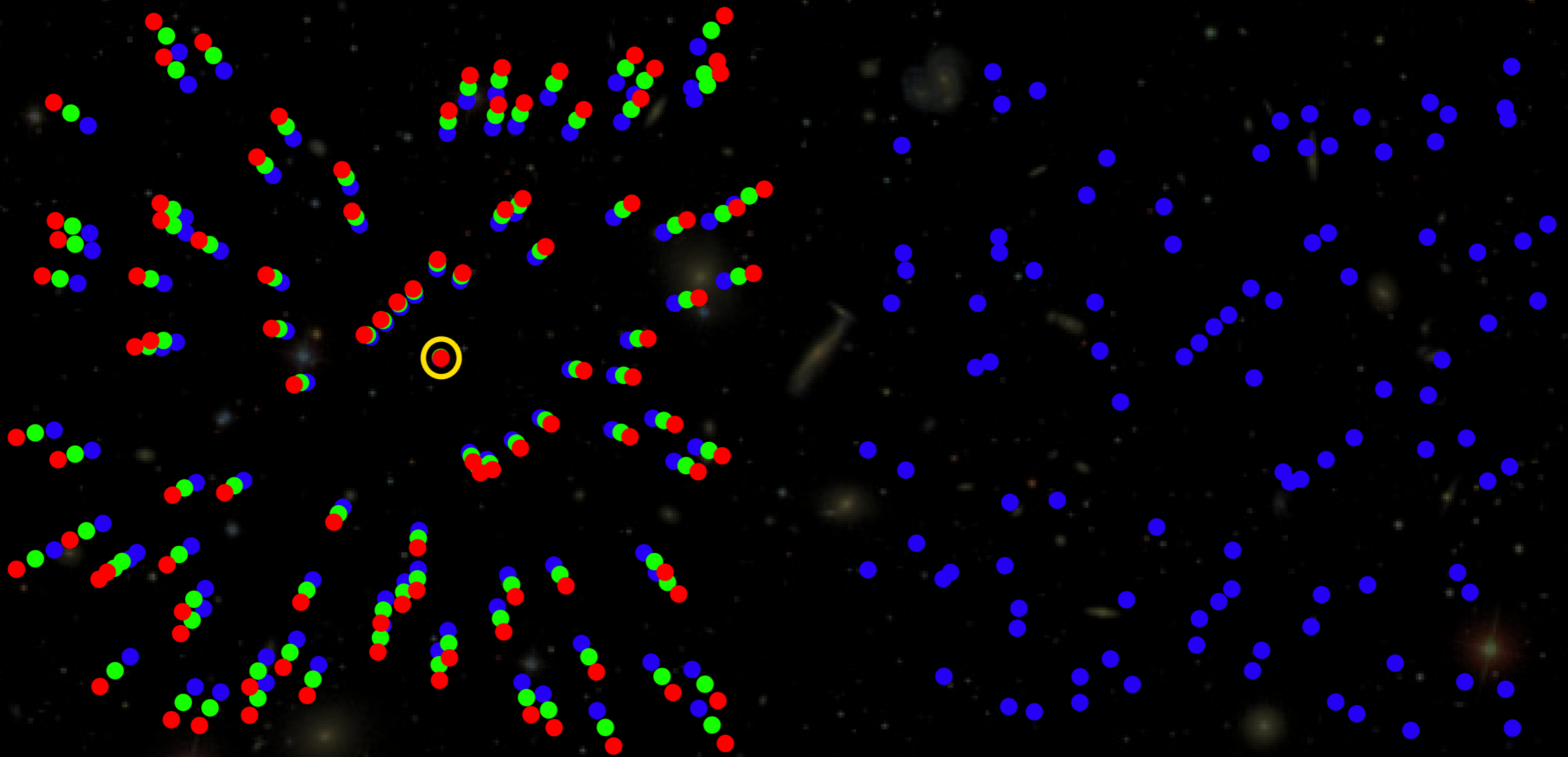
# L'expansion est globale



# L'expansion est globale

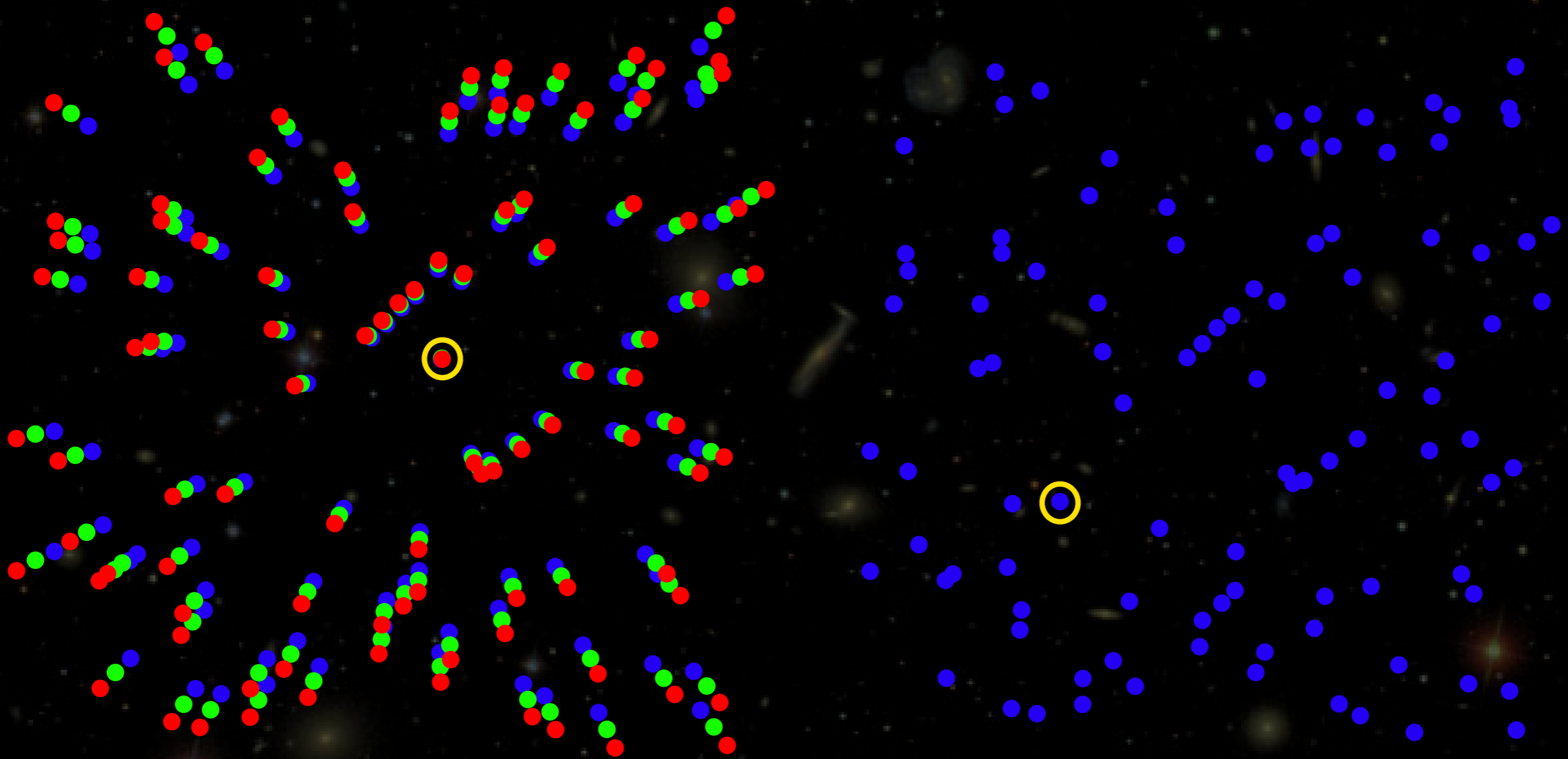


# L'expansion est globale

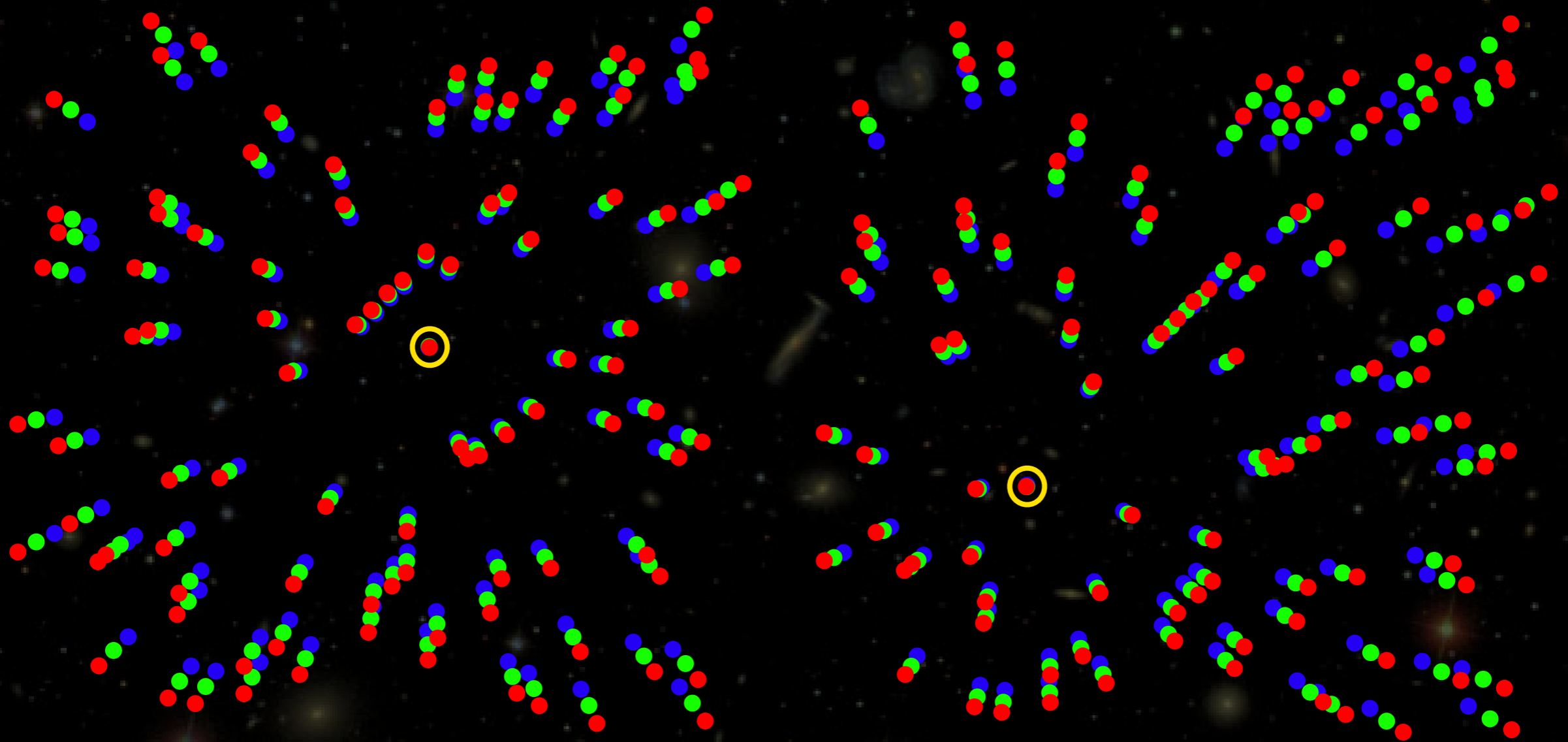




# L'expansion est globale



# L'expansion est globale



De partout en même temps ...

# L'expansion ne concerne pas les objets liés par la gravité (ou autre)

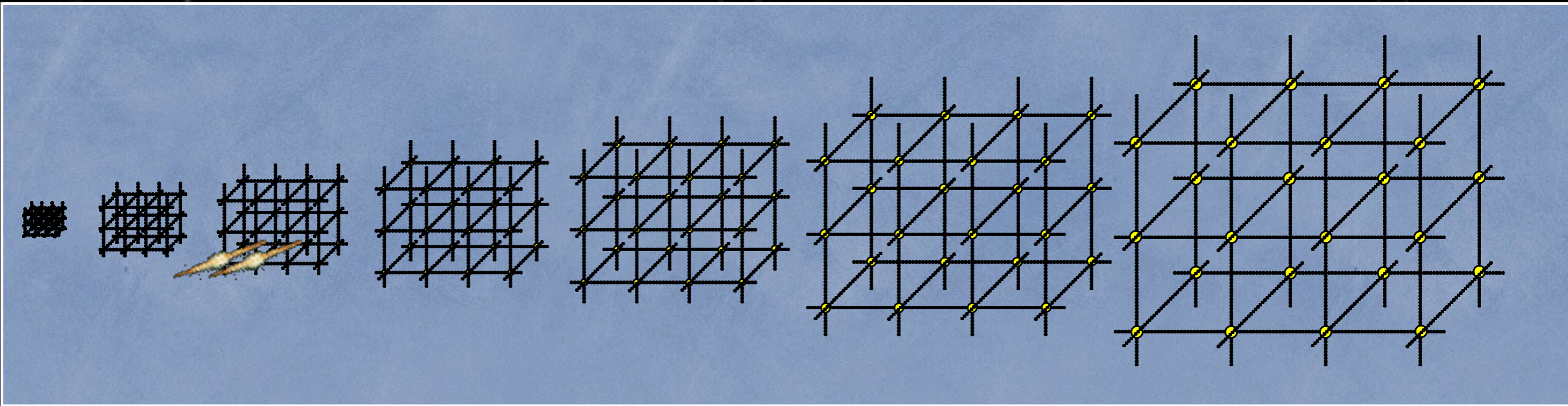


Figure: Benoît Revenu

Mrs Felix: Why don't you do your homework?  
Allen Felix: The Universe is expanding. Everything will fall apart, and we'll all die. What's the point?  
Mrs Felix: We live in Brooklyn. Brooklyn is not expanding! Go do your homework.  
*(«Annie Hall» de Woody Allen)*



# L'expansion ne concerne pas les objets liés par la gravité (ou autre)

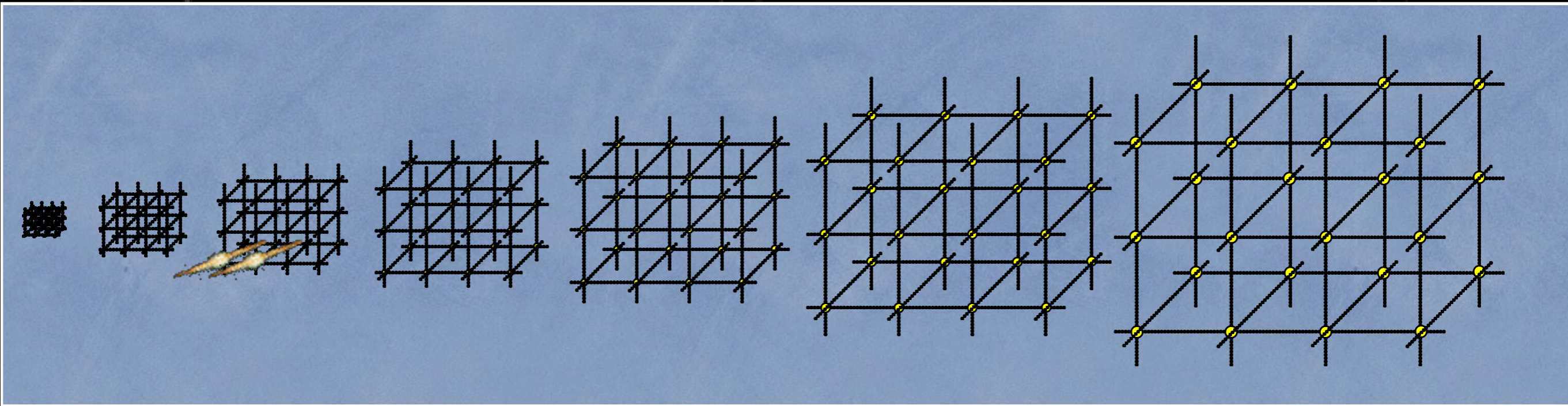


Figure: Benoît Revenu

Mrs Felix: Why don't you do your homework?  
Allen Felix: The Universe is expanding. Everything will fall apart, and we'll all die. What's the point?  
Mrs Felix: We live in Brooklyn. Brooklyn is not expanding! Go do your homework.  
*(«Annie Hall» de Woody Allen)*



# L'expansion ne concerne pas les objets liés par la gravité (ou autre)

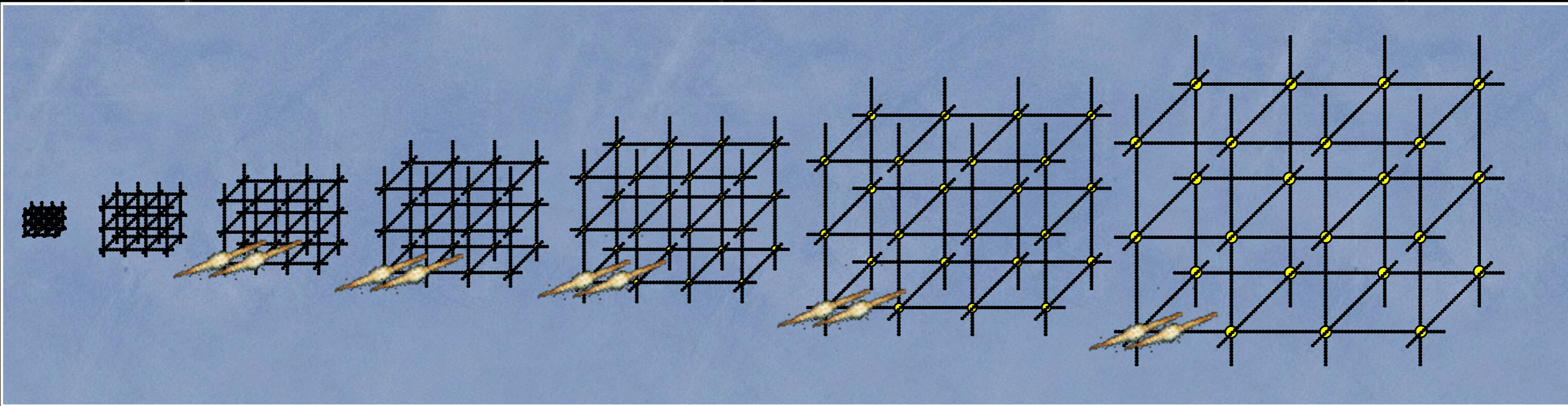


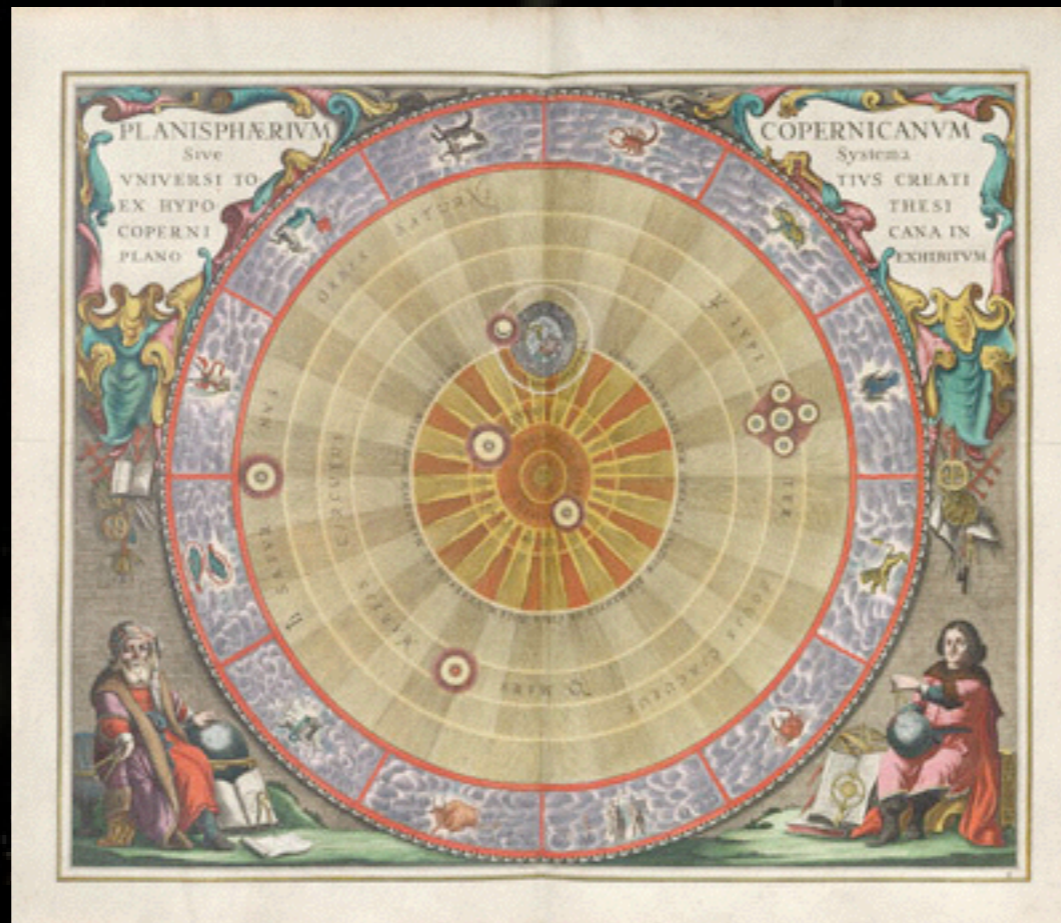
Figure: Benoît Revenu

Mrs Felix: Why don't you do your homework?  
Allen Felix: The Universe is expanding. Everything will fall apart, and we'll all die. What's the point?  
Mrs Felix: We live in Brooklyn. Brooklyn is not expanding! Go do your homework.  
*(«Annie Hall» de Woody Allen)*



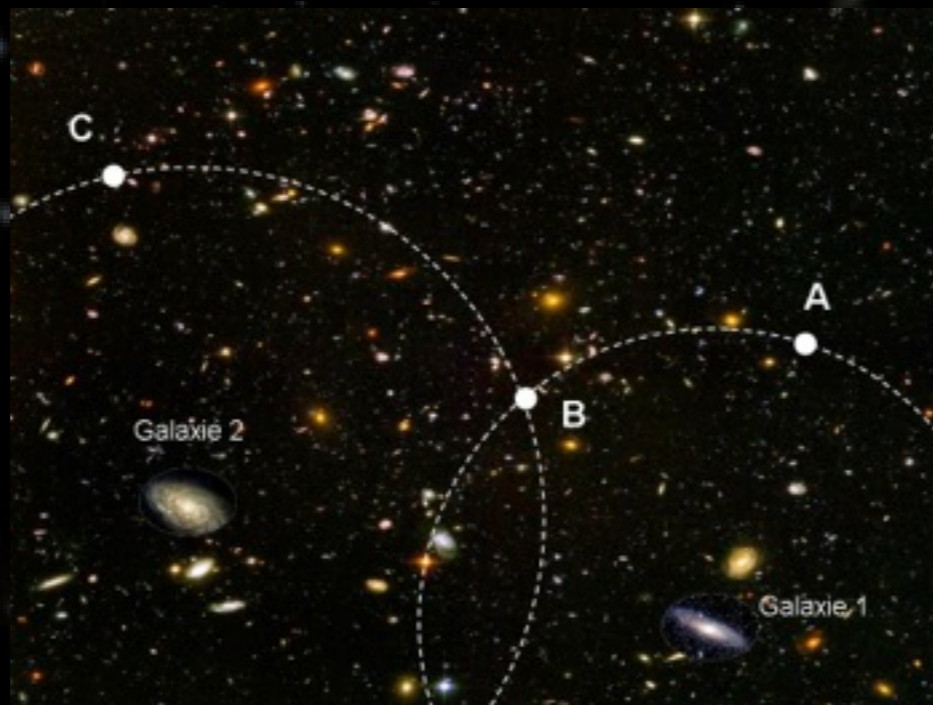
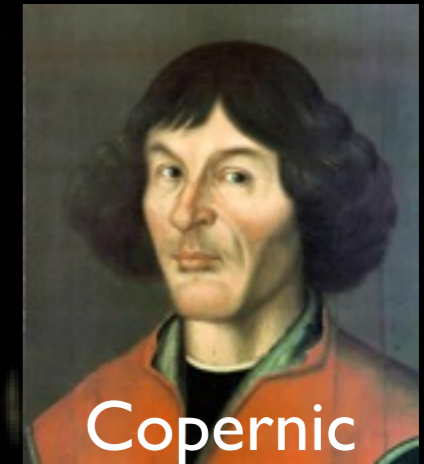
# Piliers de la cosmologie

- La relativité Générale (théorie)
- L'expansion de l'Univers (observation)
- Le principe cosmologique (hypothèse puis observation)



# Le principe cosmologique

- Idée tirée du principe Copernicien
  - ★ La Terre n'est pas au centre du système solaire [1543]
- Extension à la cosmologie
  - ★ L'univers est isotrope et n'a pas de point de vue privilégié
  - ➔ il est homogène



isotropie pour la galaxie 1 :  
propriétés de A et B identiques

isotropie pour la galaxie 2 :  
propriétés de B et C identiques

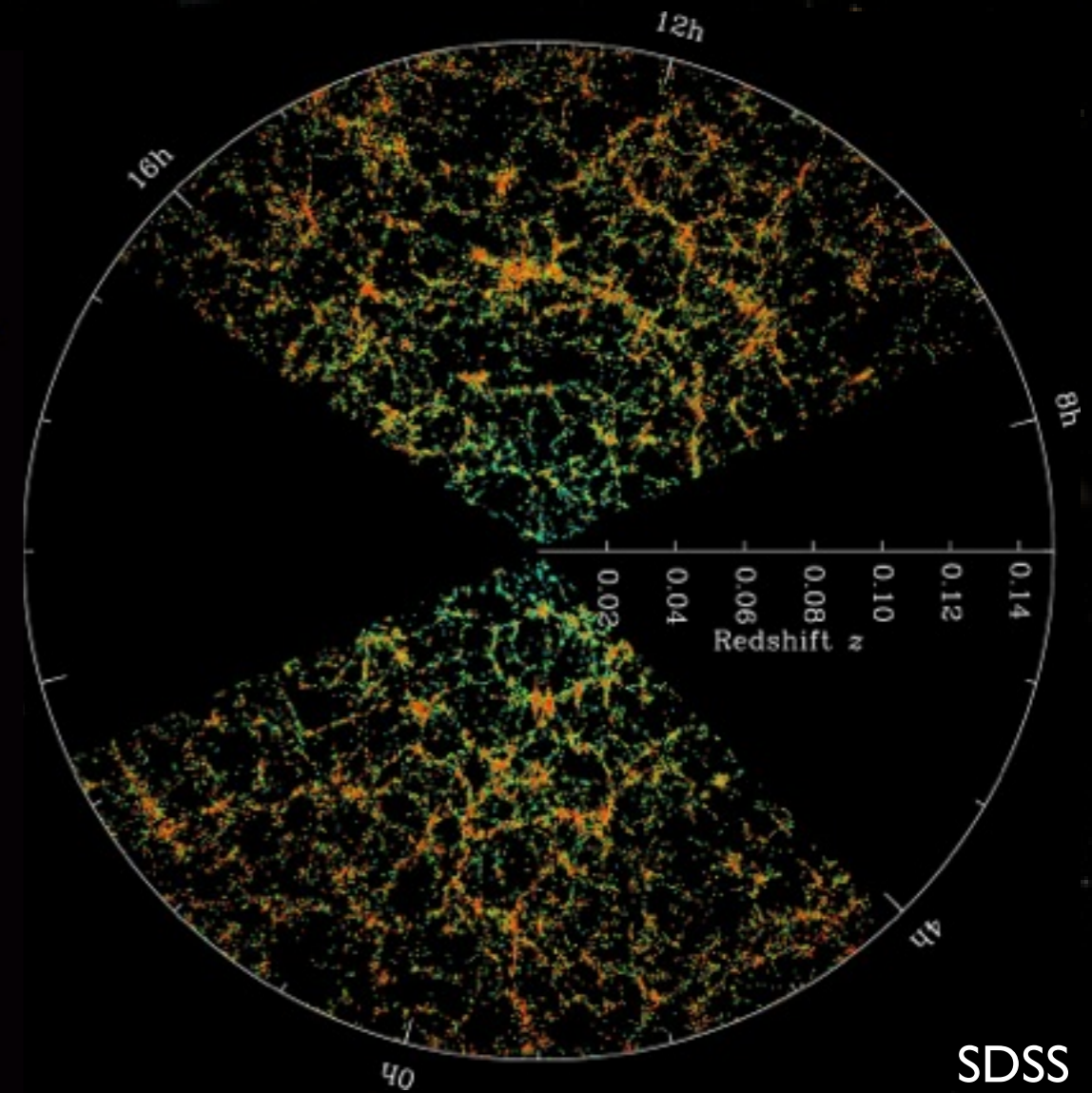
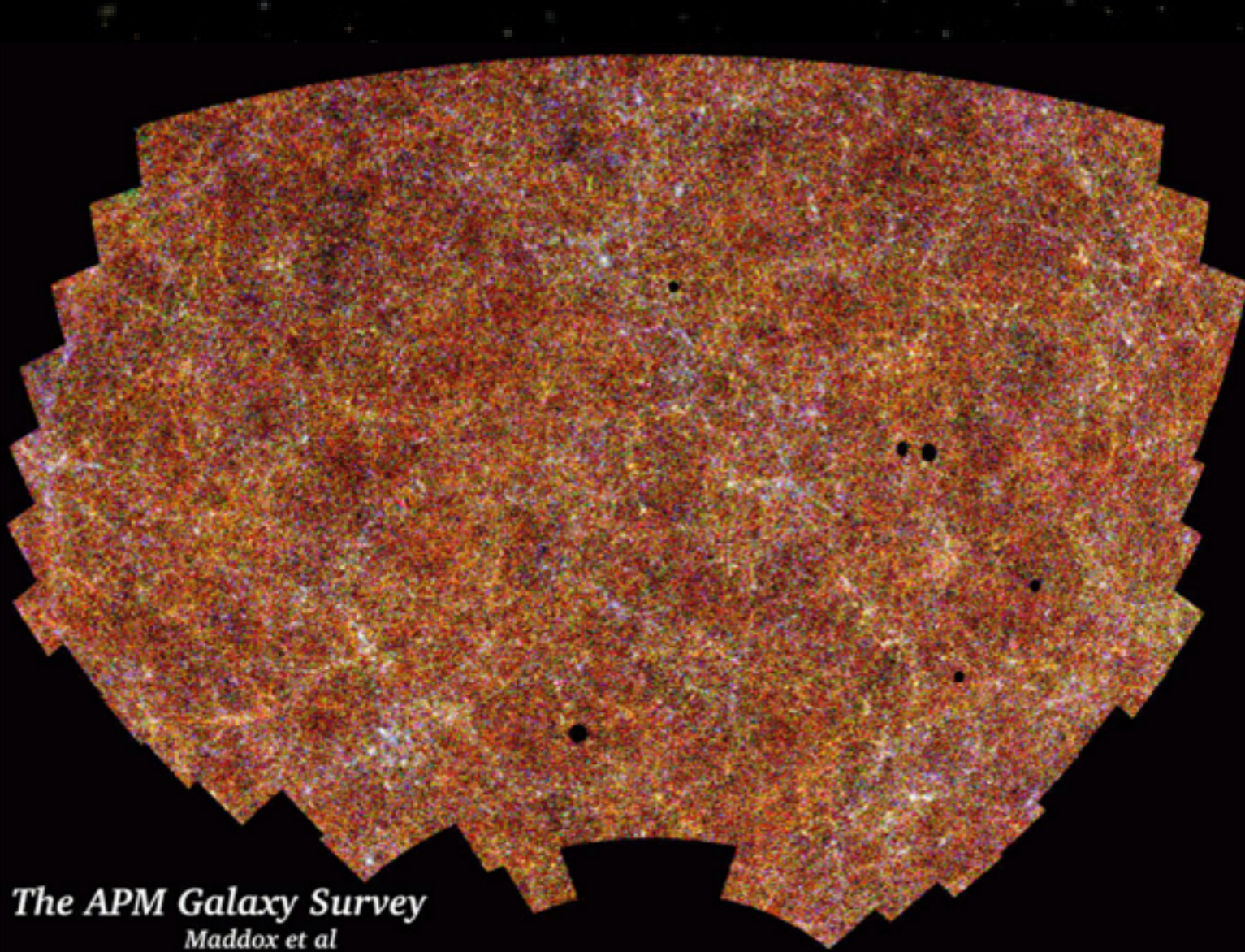
donc les propriétés  
cosmologiques en A et en C sont  
identiques = homogénéité

- «L'Univers est homogène et isotrope» (aux grandes échelles)



# Le principe cosmologique :

«Aux grandes échelles l'Univers est homogène et isotrope»



~ 2 Millions de galaxies projetées sur la sphère céleste  
~30 degrés de largeur, 2Glyr de profondeur

~ 2 Millions de galaxies en 3D  
2Glyr de profondeur





# Isotropie : le CMB (cf. plus tard)

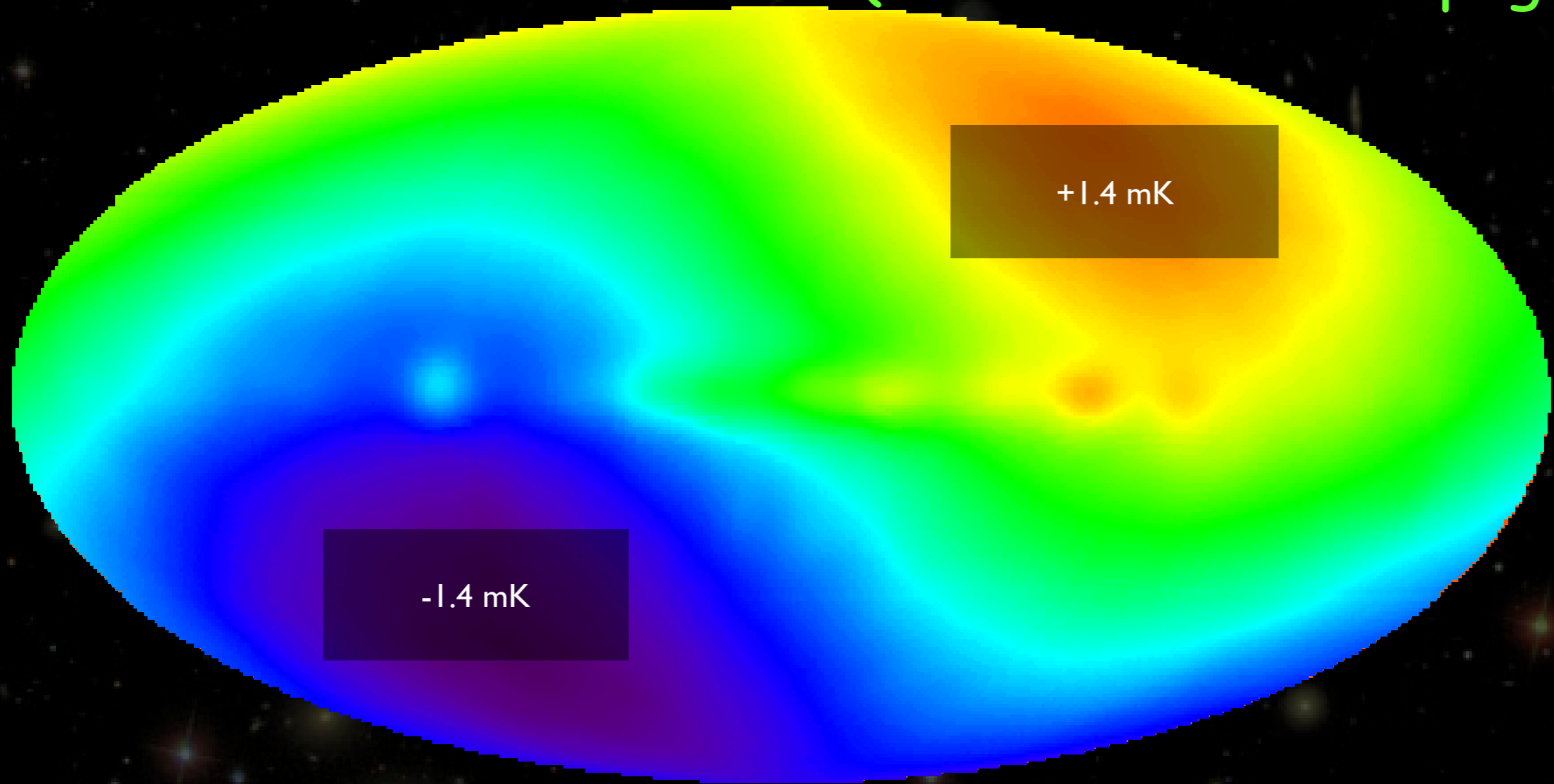
(COBE/DMR homepage)

corps noir à 3 K



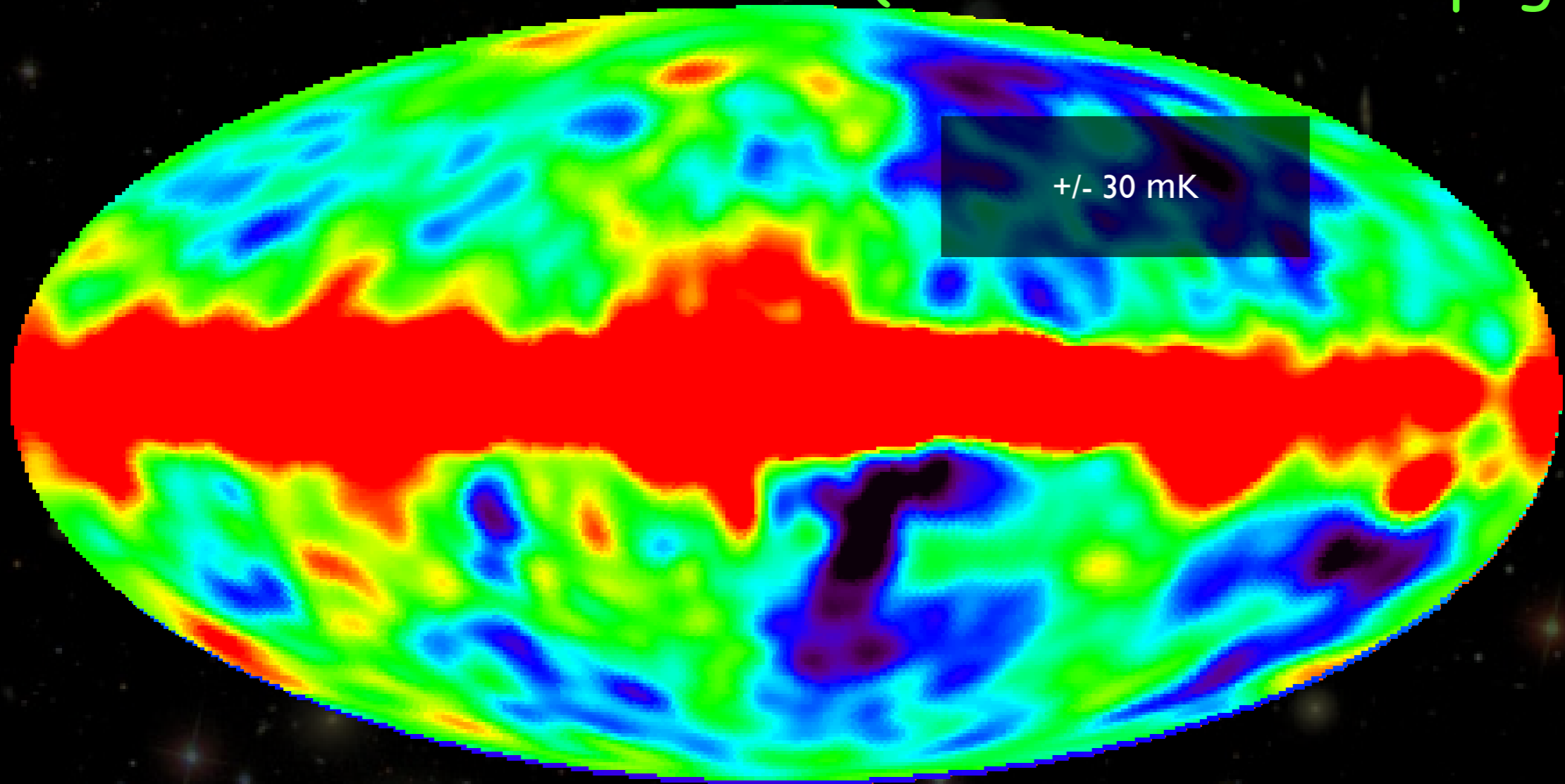
# Isotropie : le CMB (cf. plus tard)

(COBE/DMR homepage)



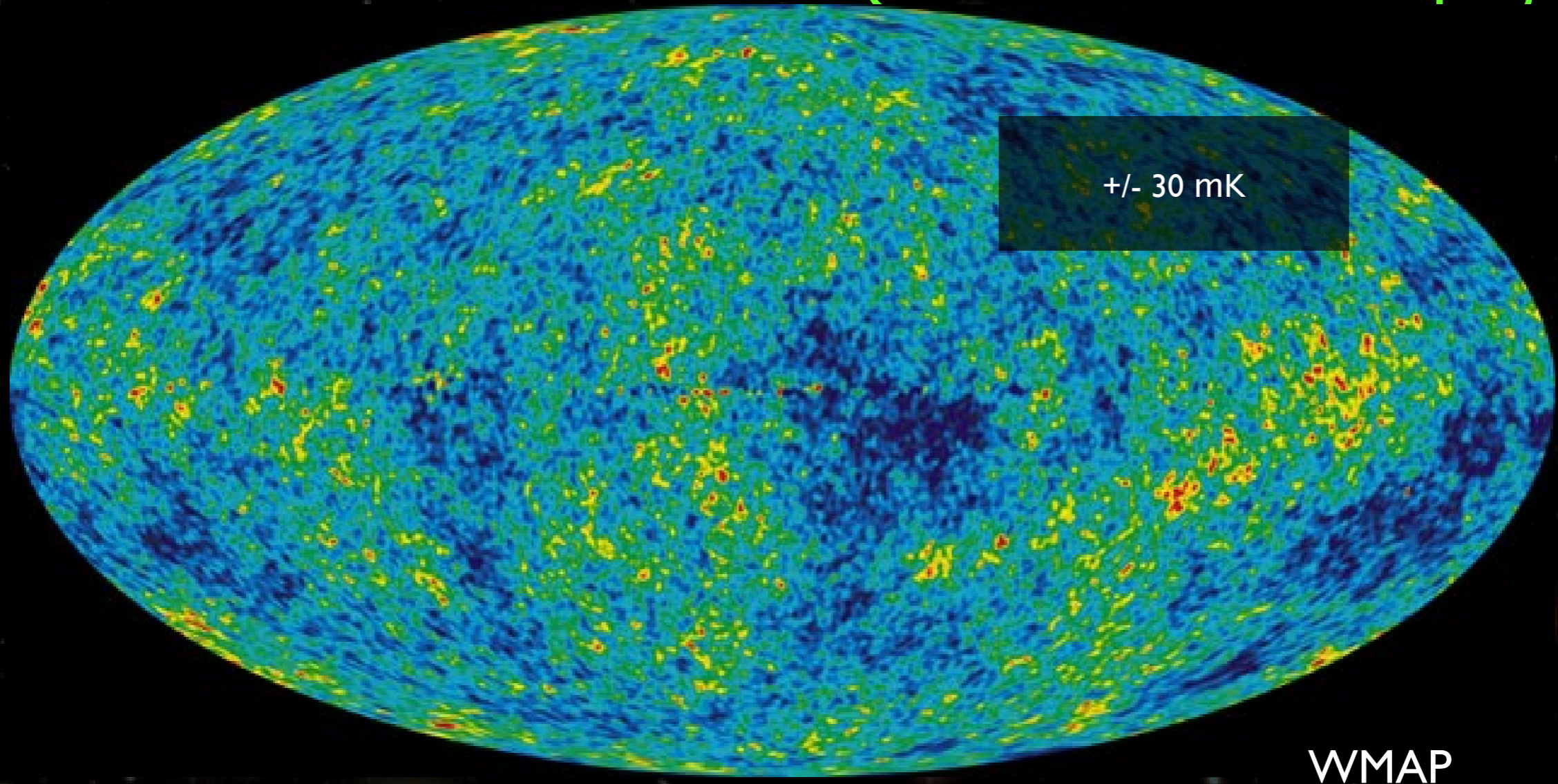
# Isotropie : le CMB (cf. plus tard)

(COBE/DMR homepage)



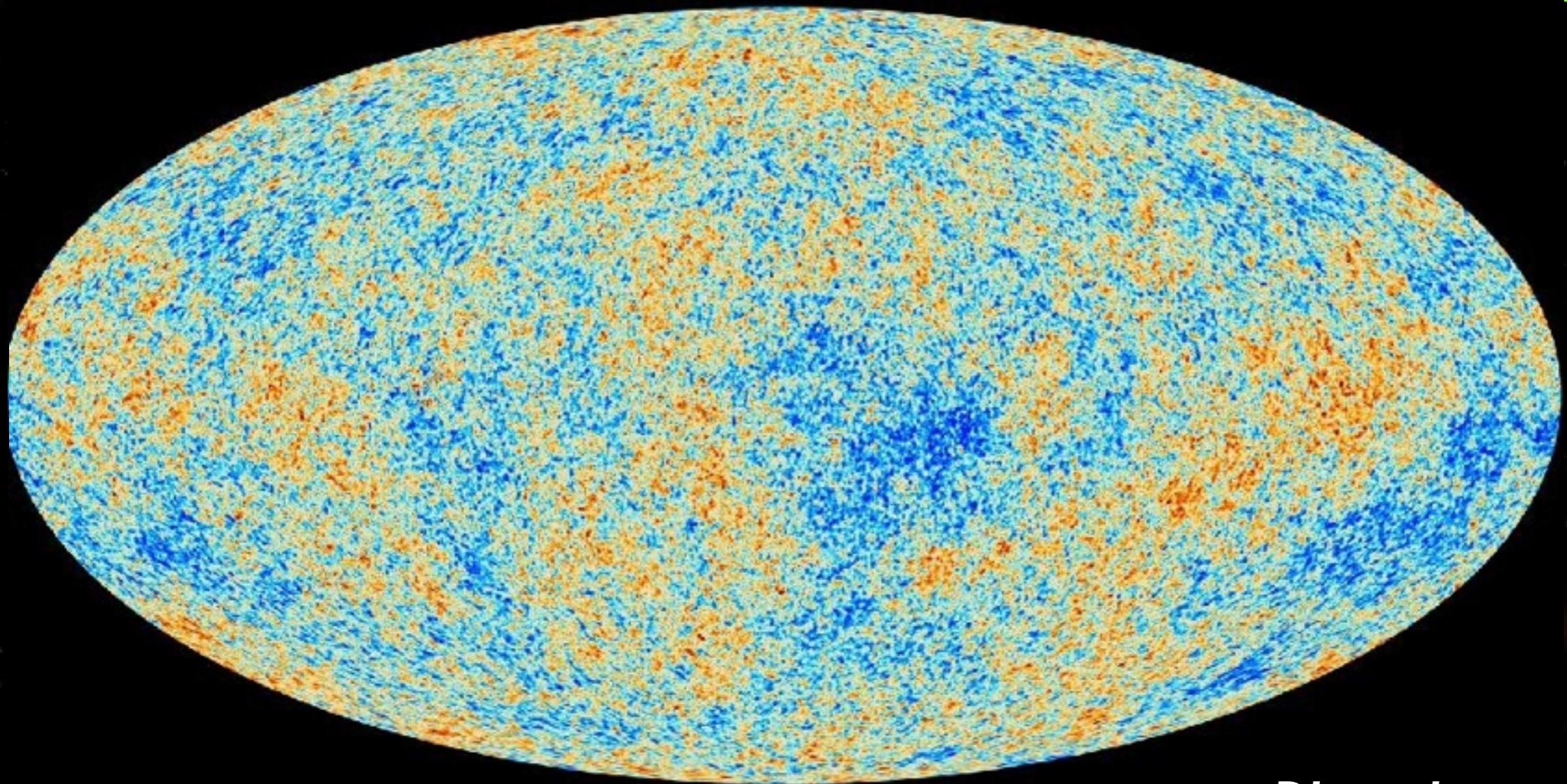
# Isotropie : le CMB (cf. plus tard)

(COBE/DMR homepage)



# Isotropie : le CMB (cf. plus tard)

☺)

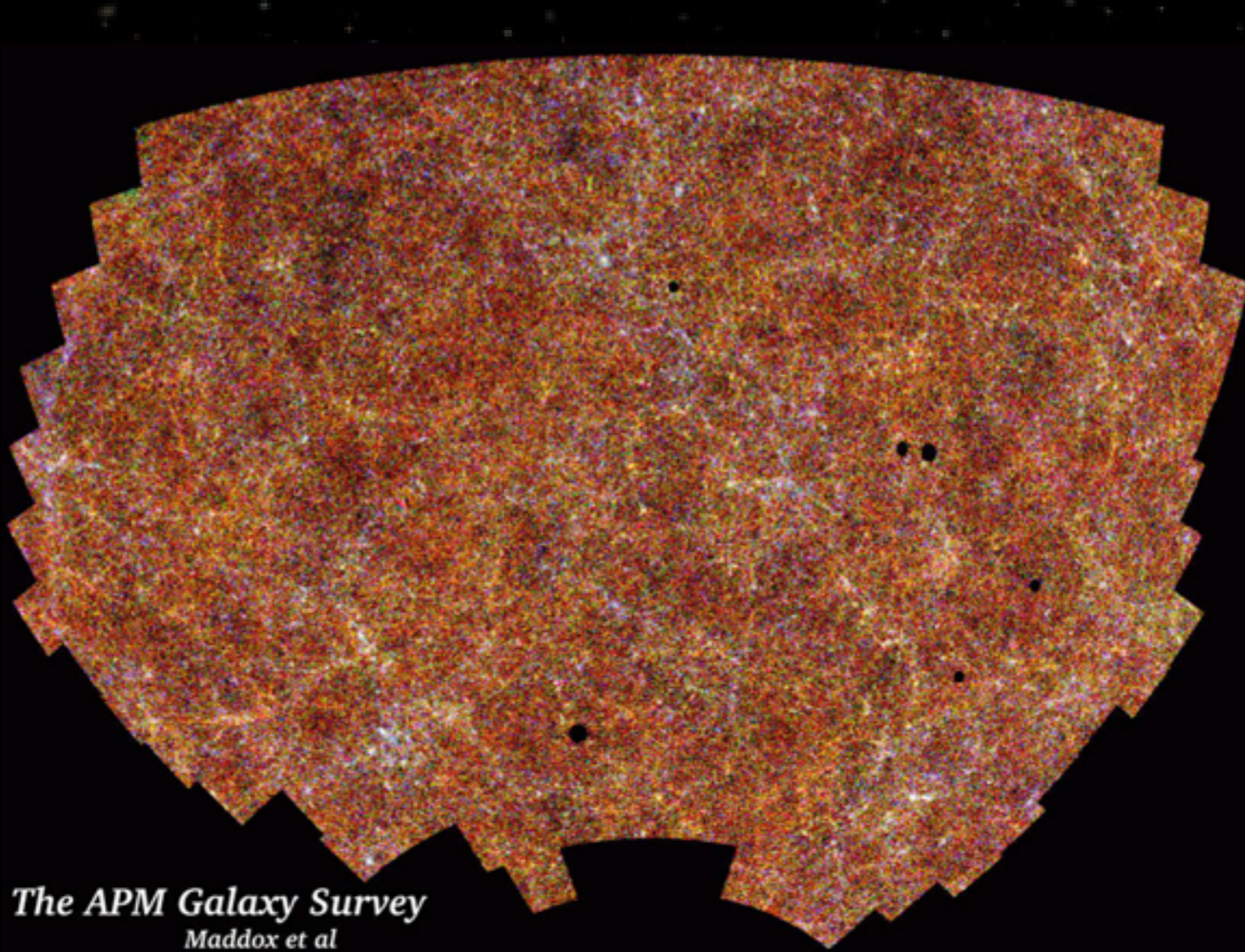


*Planck*

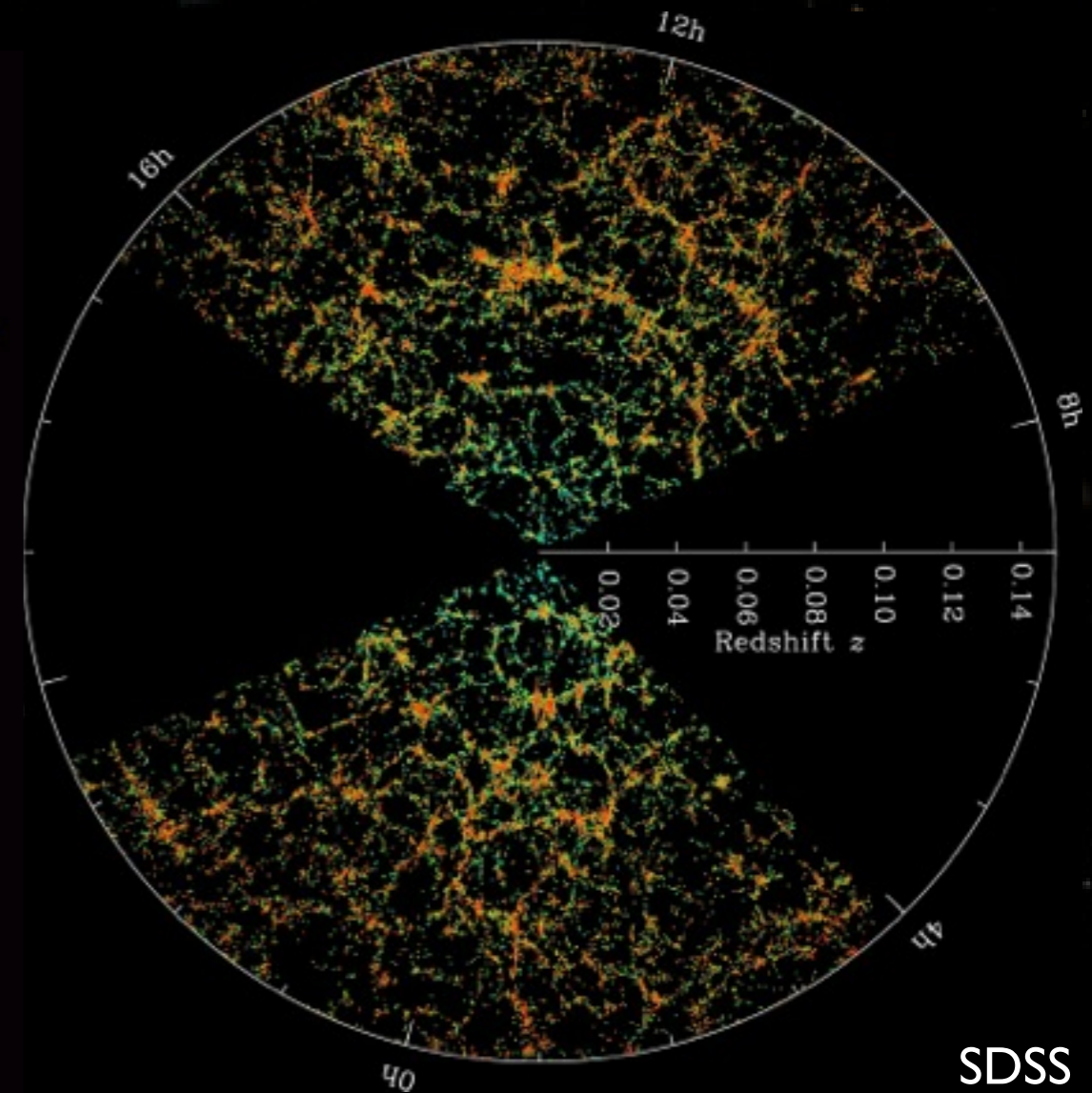


# Le principe cosmologique :

«Aux grandes échelles l'Univers est homogène et isotrope»



~ 2 Millions de galaxies projetées sur la sphère céleste  
~30 degrés de largeur, 2Glyr de profondeur

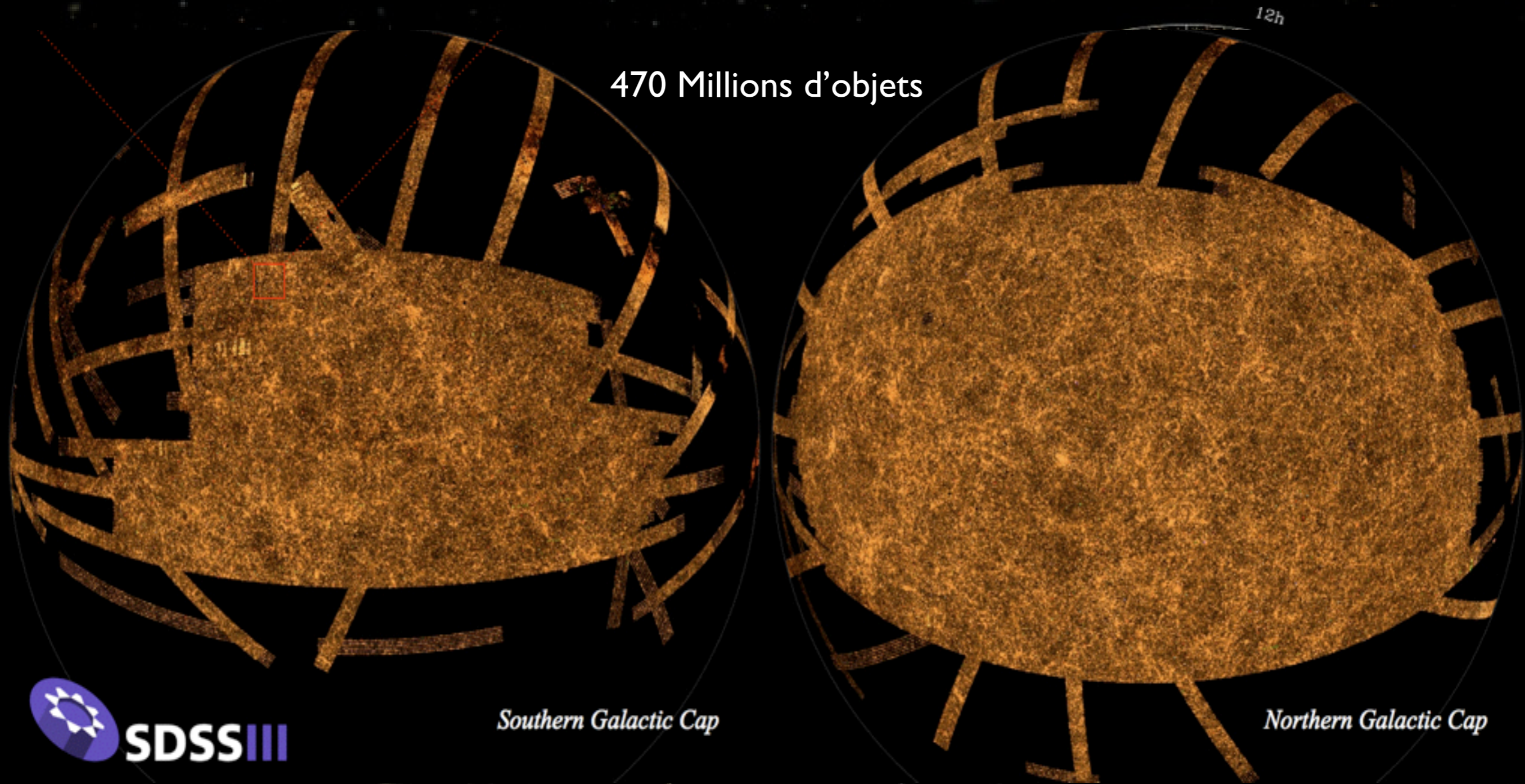


~ 2 Millions de galaxies en 3D  
2Glyr de profondeur

# Le principe cosmologique :

«Aux grandes échelles l'Univers est homogène et isotrope»

470 Millions d'objets

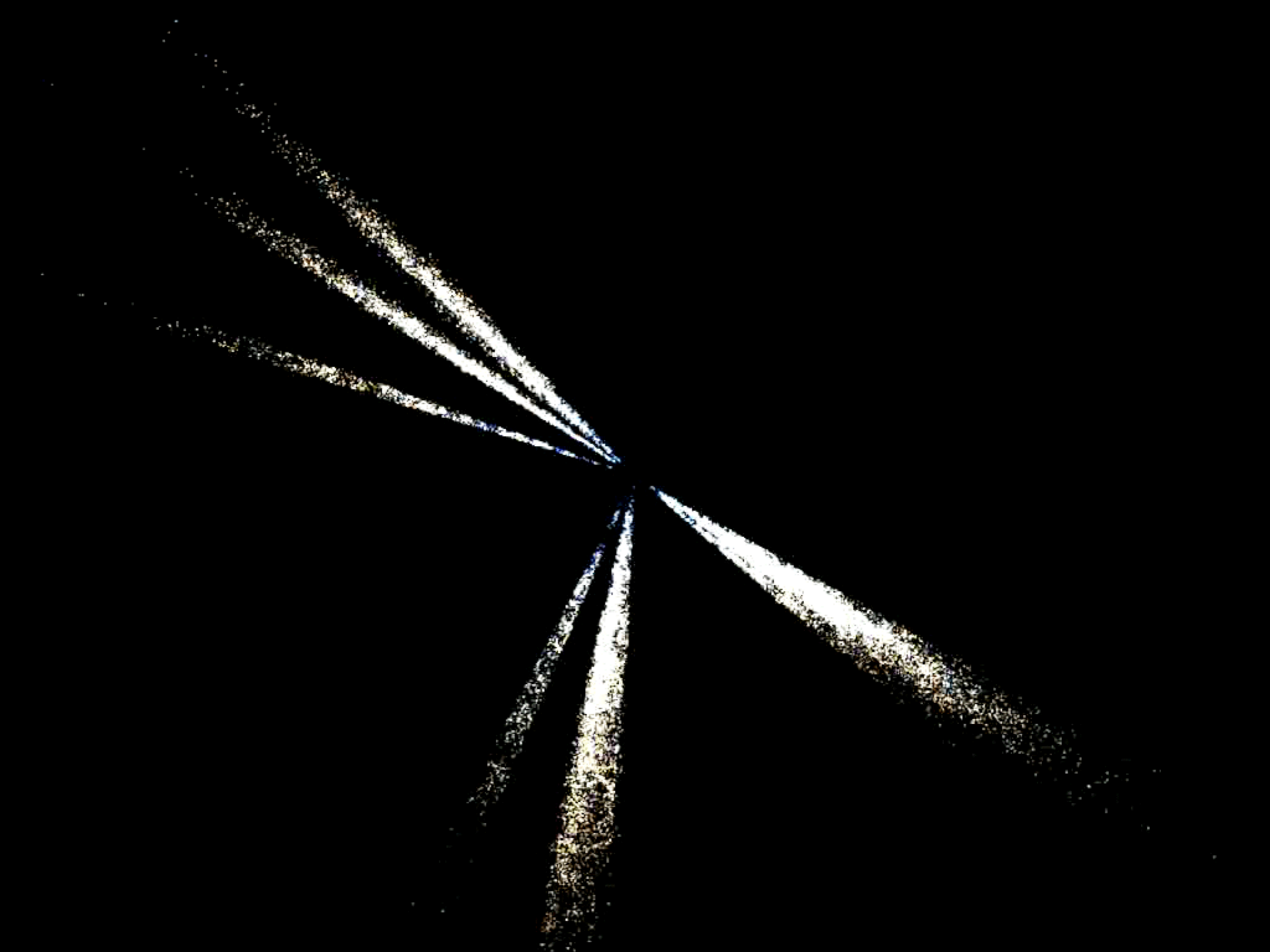


 SDSS III

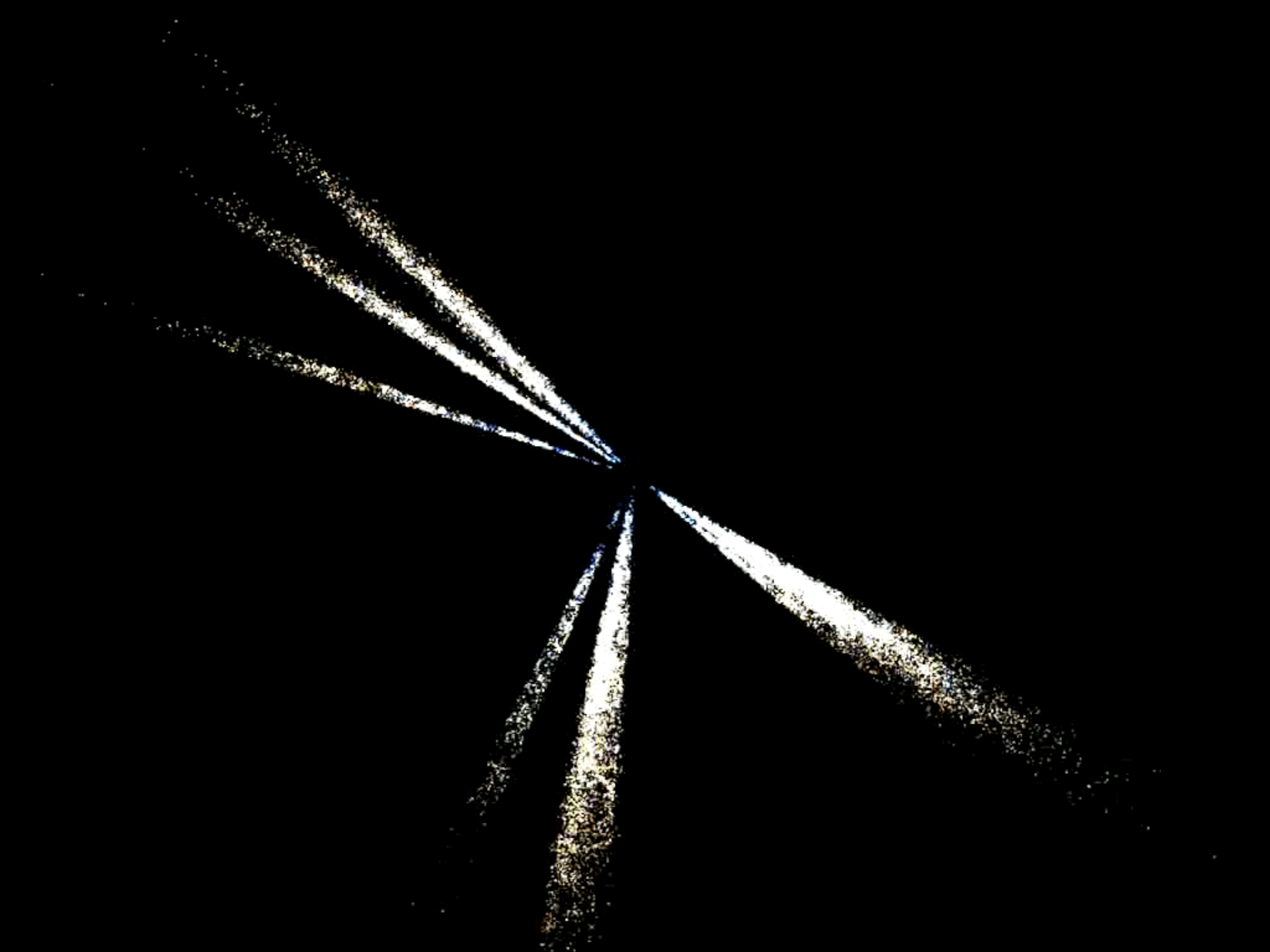
*Southern Galactic Cap*

*Northern Galactic Cap*



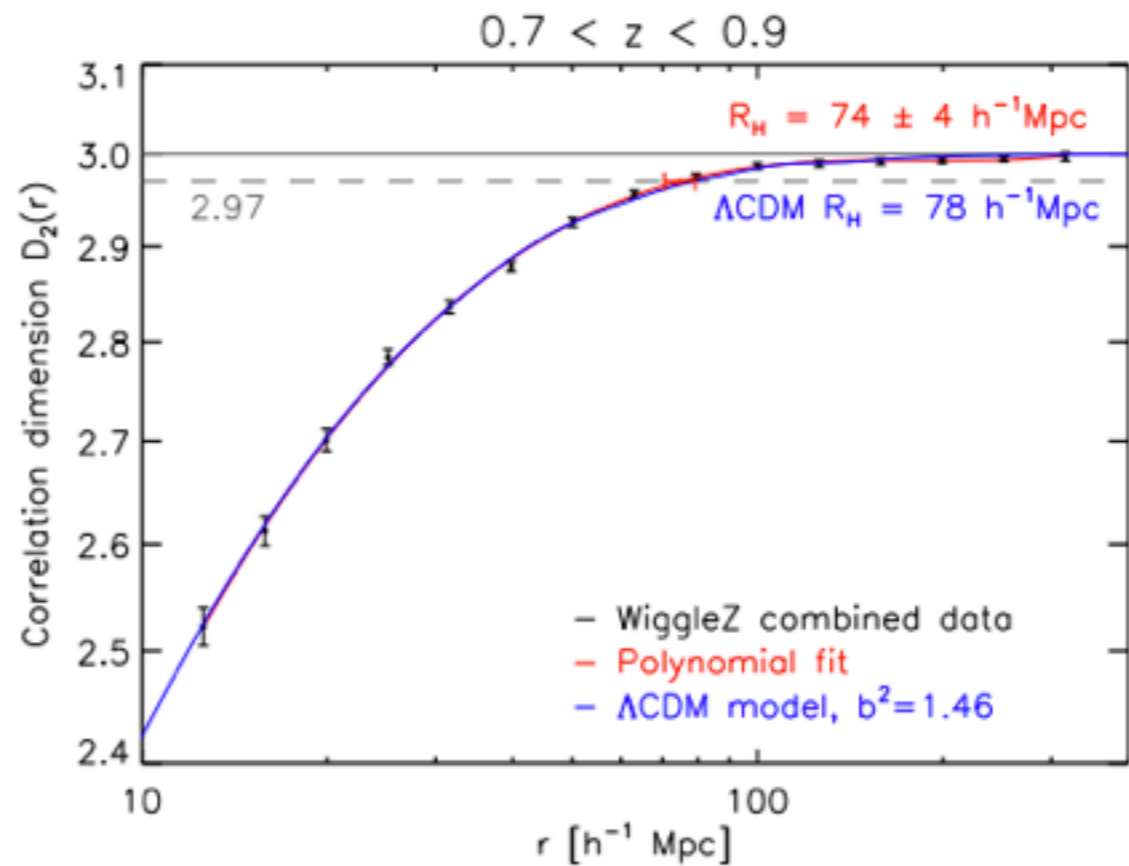
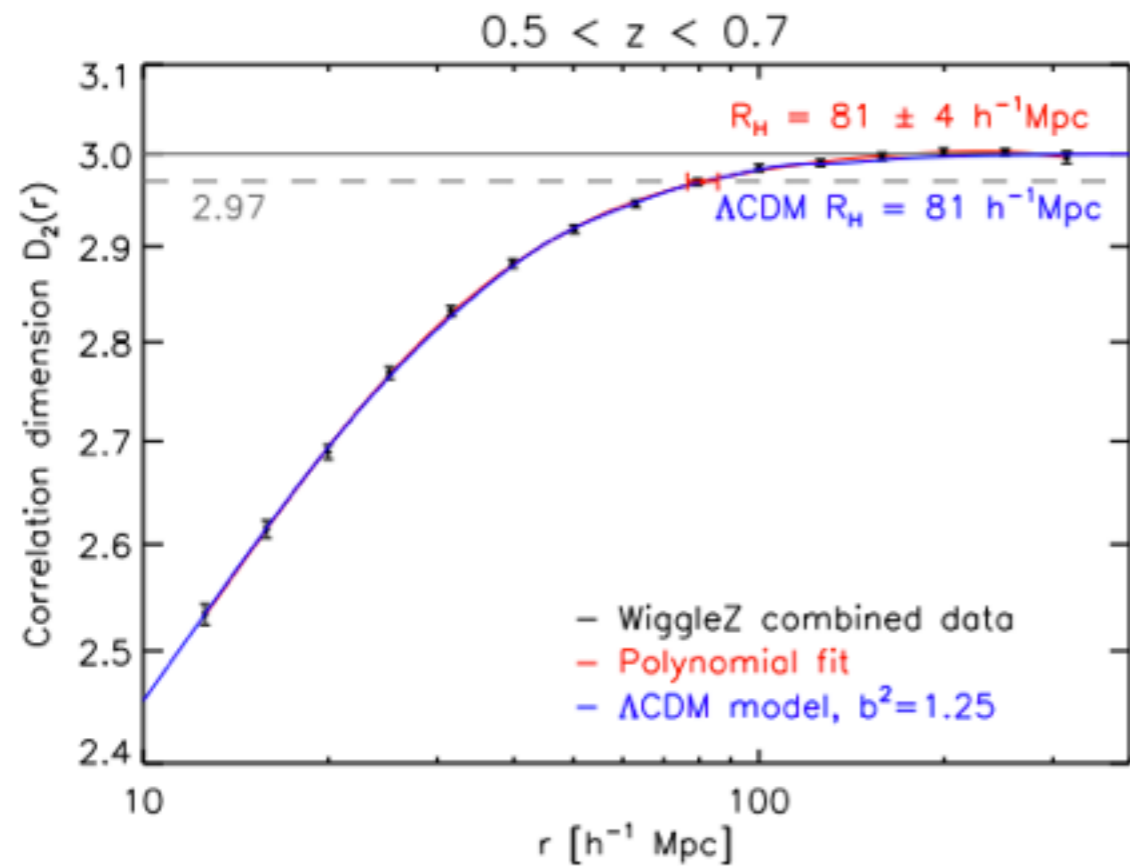
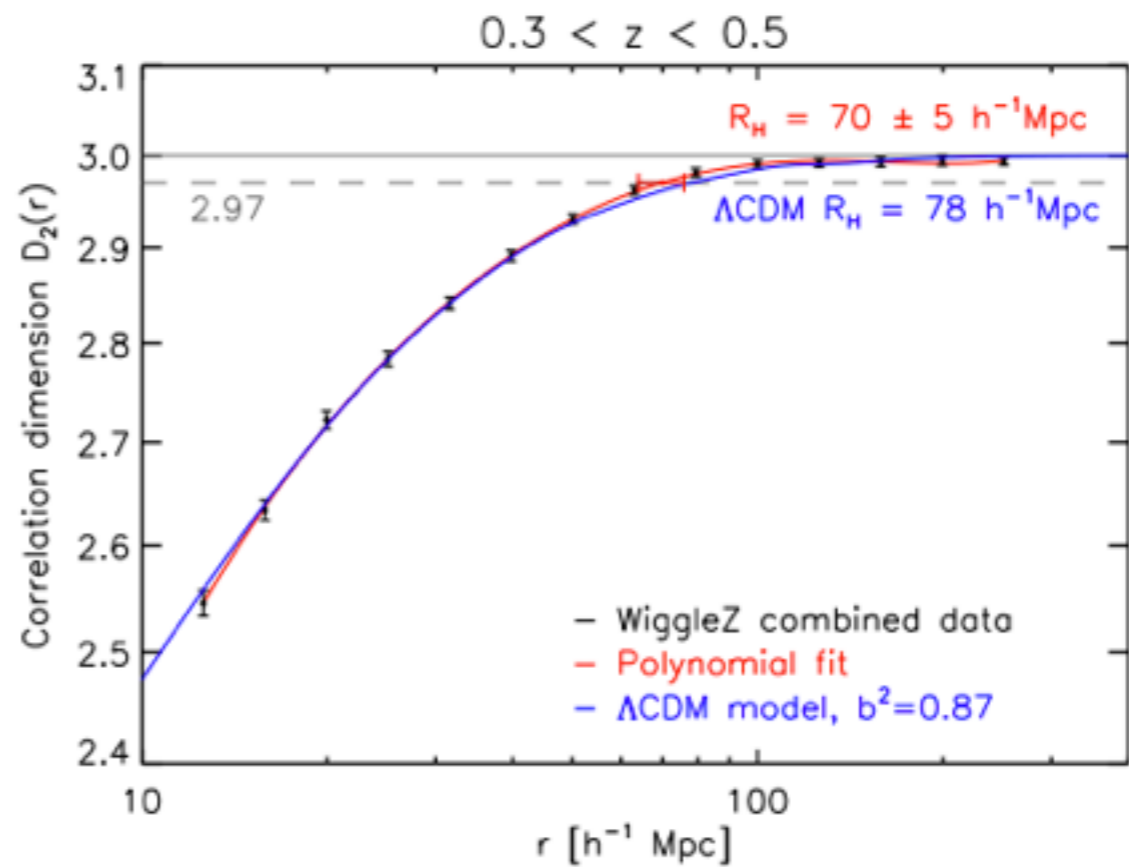
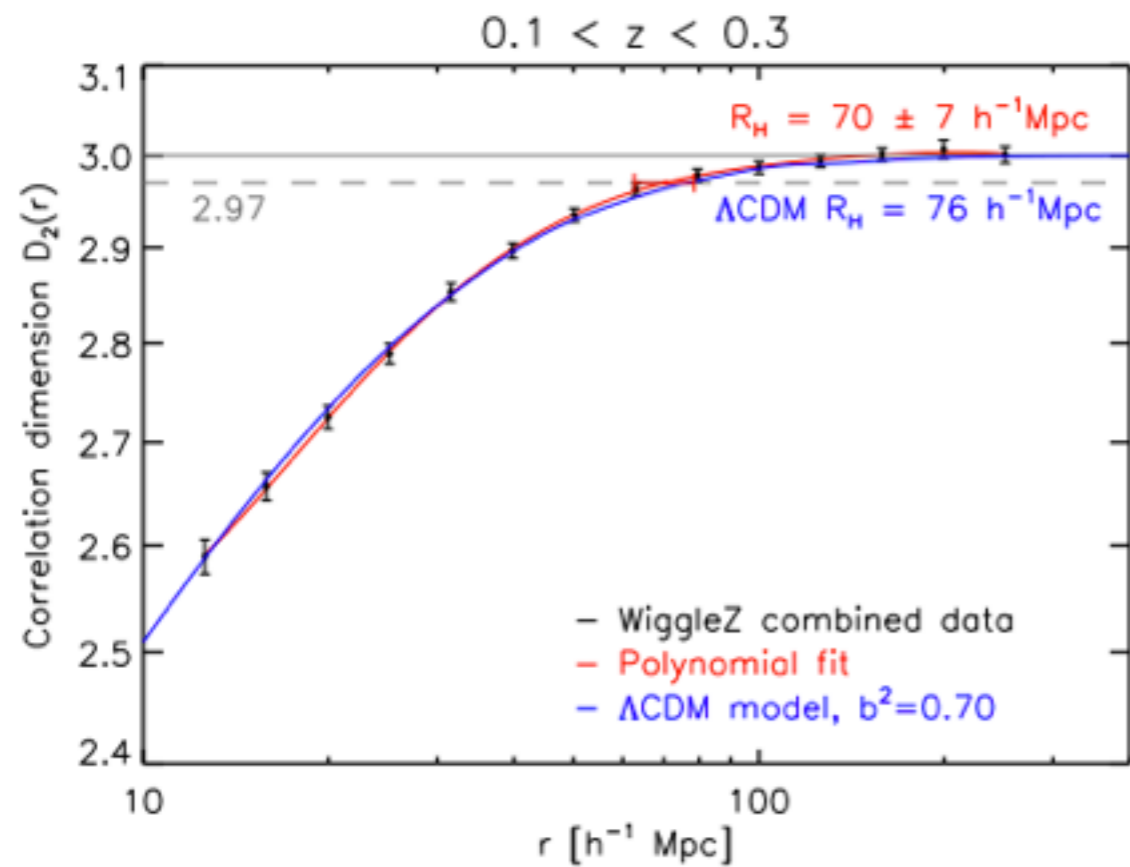




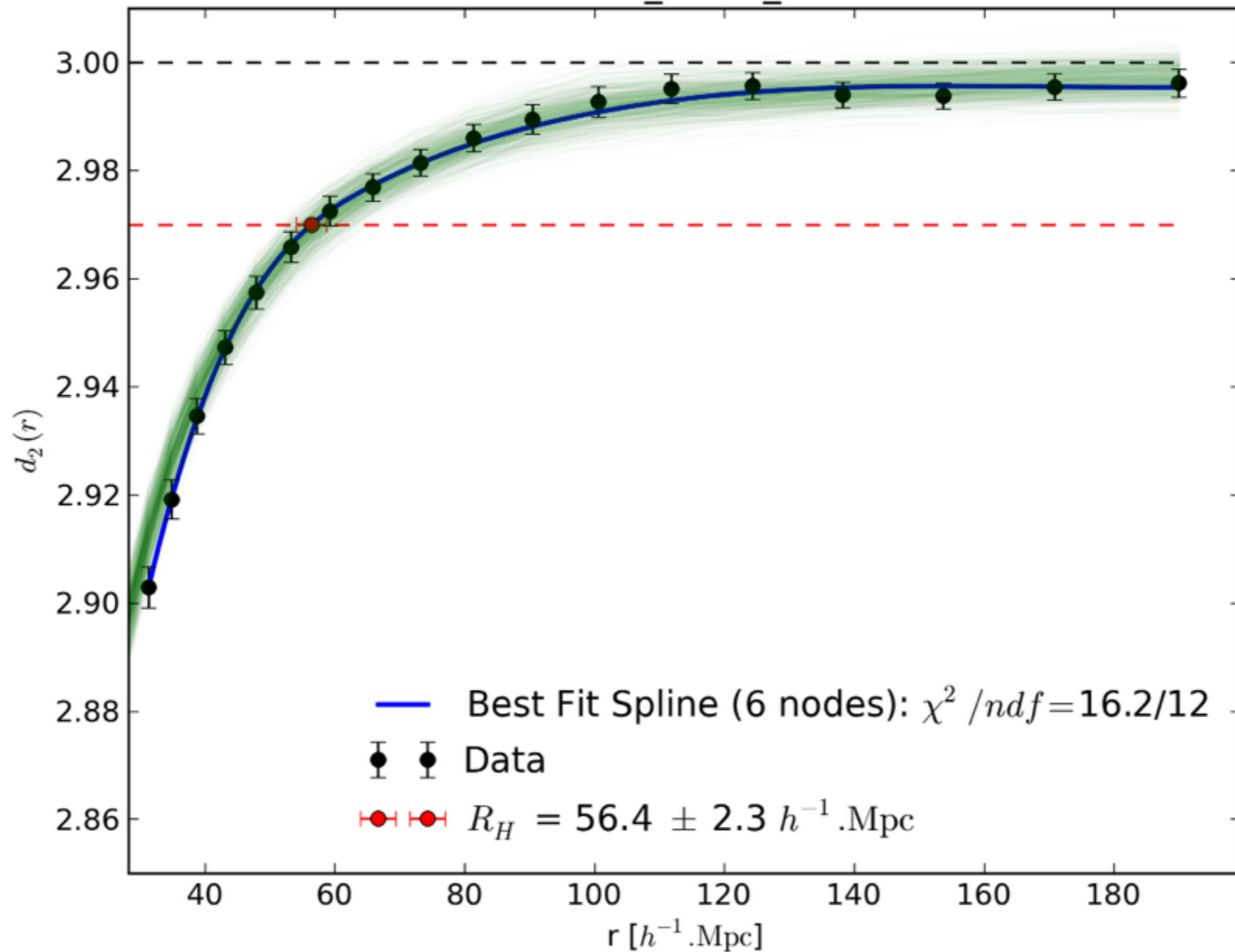


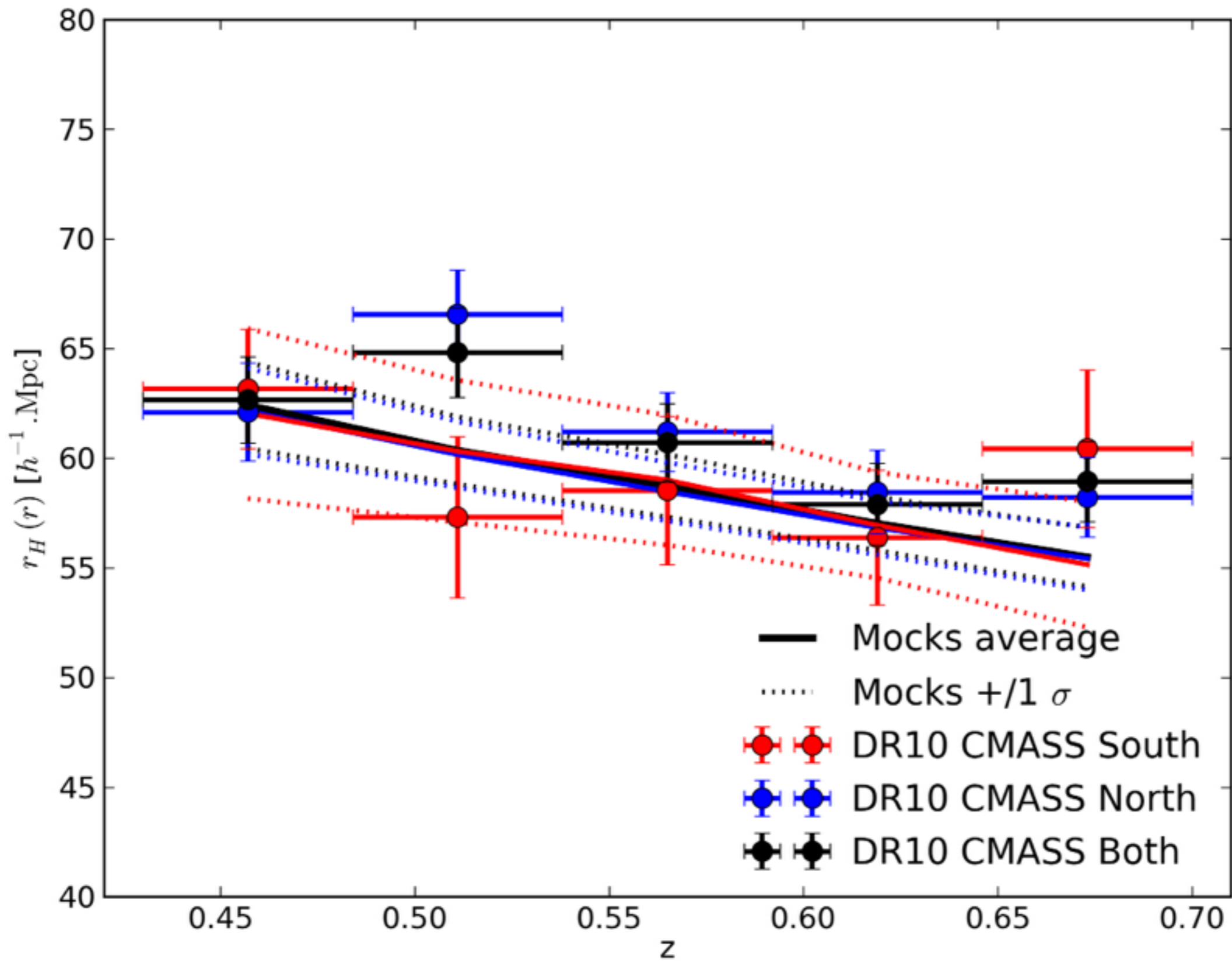






South - z\_0.592\_0.646





# Principe cosmologique

- L'isotropie semble bien confirmée par les données
- L'homogénéité est plus délicate
- Pas de vraie base observationnelle pour le principe copernicien
  - ★ Difficile d'explorer les solutions inhomogènes en R.G. et donc de les confronter aux observations
  - ★ Mais:
    - Pas de distorsions spectrales dans le CMB (Cf. plus loin)
    - Pas d'effet SZ cinétique sur les amas
  - ★ Cela semble une hypothèse raisonnable...
  - ★ Attention toutefois:
    - l'énergie noire est un mystère qui se traduit par une expansion accélérée
    - l'Univers n'est pas «parfaitement» homogène... effet des fluctuations sur l'expansion ?

