

Évolution de l'Univers

le modèle standard de la cosmologie



Jean-Christophe Hamilton
APC

hamilton@apc.univ-paris7.fr

Plan du cours

- Cours I : Une vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Le modèle standard FLRW - alias Big Bang
- Cours II : La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Histoire thermique et mesures de distances
- Cours III : La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Matière noire, énergie sombre, fond diffus cosmologique
- Cours IV : Le futur de la cosmologie: l'Univers primordial
 - ★ Inflation, polarisation du fond diffus cosmologique



Plan du cours

- Cours I : Une vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Les échelles en cosmologie
 - ★ Les piliers de la cosmologie
 - Relativité Générale (quelques mots)
 - Expansion de l'Univers, modèle du Big Bang
 - Principe cosmologique
 - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)
 - Métrique FLRW
 - Redshift, taux d'expansion
 - Équations de Friedman
 - Densités des espèces composant l'Univers
 - Expansion lors de diverses ères
 - Quelques mots sur le «Big Bang» ...
 - ★ F.A.Q. de cosmologie
 - ★ Histoire «thermique» de l'Univers
 - Transitions de phase
 - Nucléosynthèse primordiale
 - Égalité matière-rayonnement
 - Découplage matière-rayonnement
 - Pic acoustique des baryons
 - Formation des structures
 - Ré-ionisation
 - premières étoiles, galaxies, supernovae ...



Plan du cours

- Cours I : Une vue d'ensemble de la cosmologie

- ★ Les échelles en cosmologie

- ★ Les piliers de la cosmologie

- Relativité Générale (quelques mots)
- Expansion de l'Univers, modèle du Big Bang
- Principe cosmologique

- ★ L'Univers de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

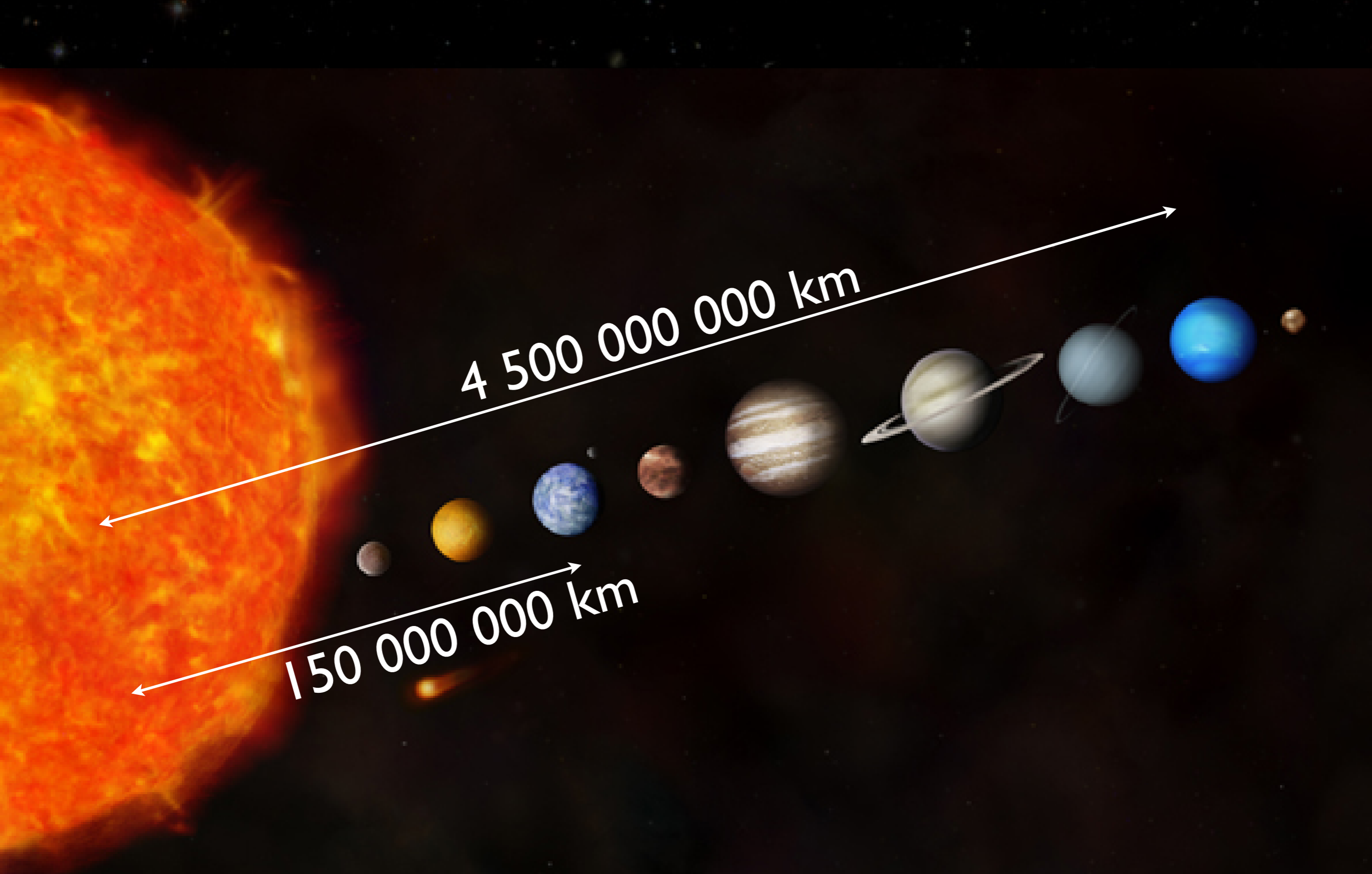
- Métrique FLRW
- Redshift, taux d'expansion
- Équations de Friedman
- Densités des espèces composant l'Univers
- Expansion lors de diverses ères
- Quelques mots sur le «Big Bang» ...

- ★ F.A.Q. de cosmologie

- ★ Histoire «thermique» de l'Univers

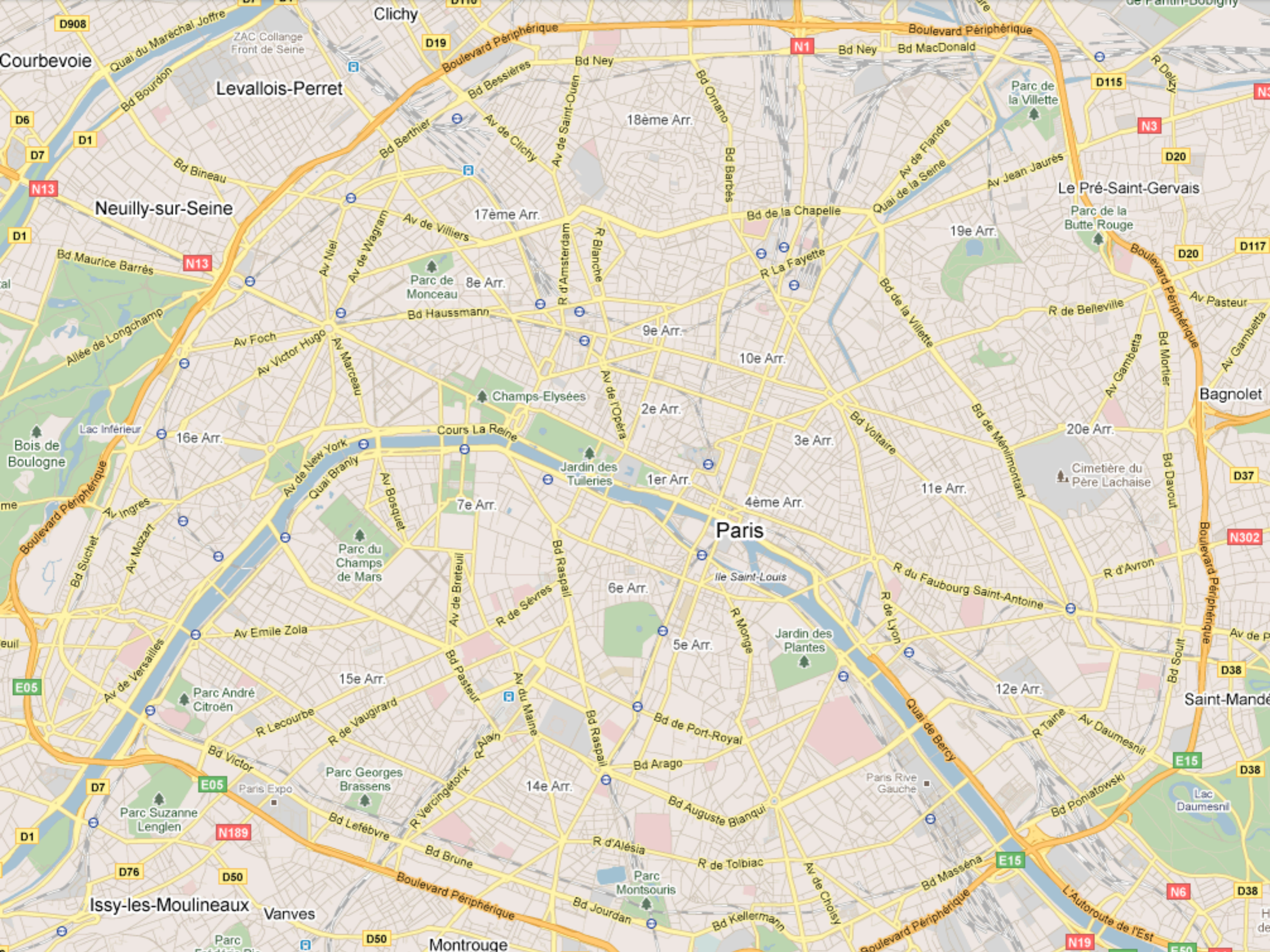
- Transitions de phase
- Nucléosynthèse primordiale
- Égalité matière-rayonnement
- Découplage matière-rayonnement
- Pic acoustique des baryons
- Formation des structures
- Ré-ionisation
- premières étoiles, galaxies, supernovae ...

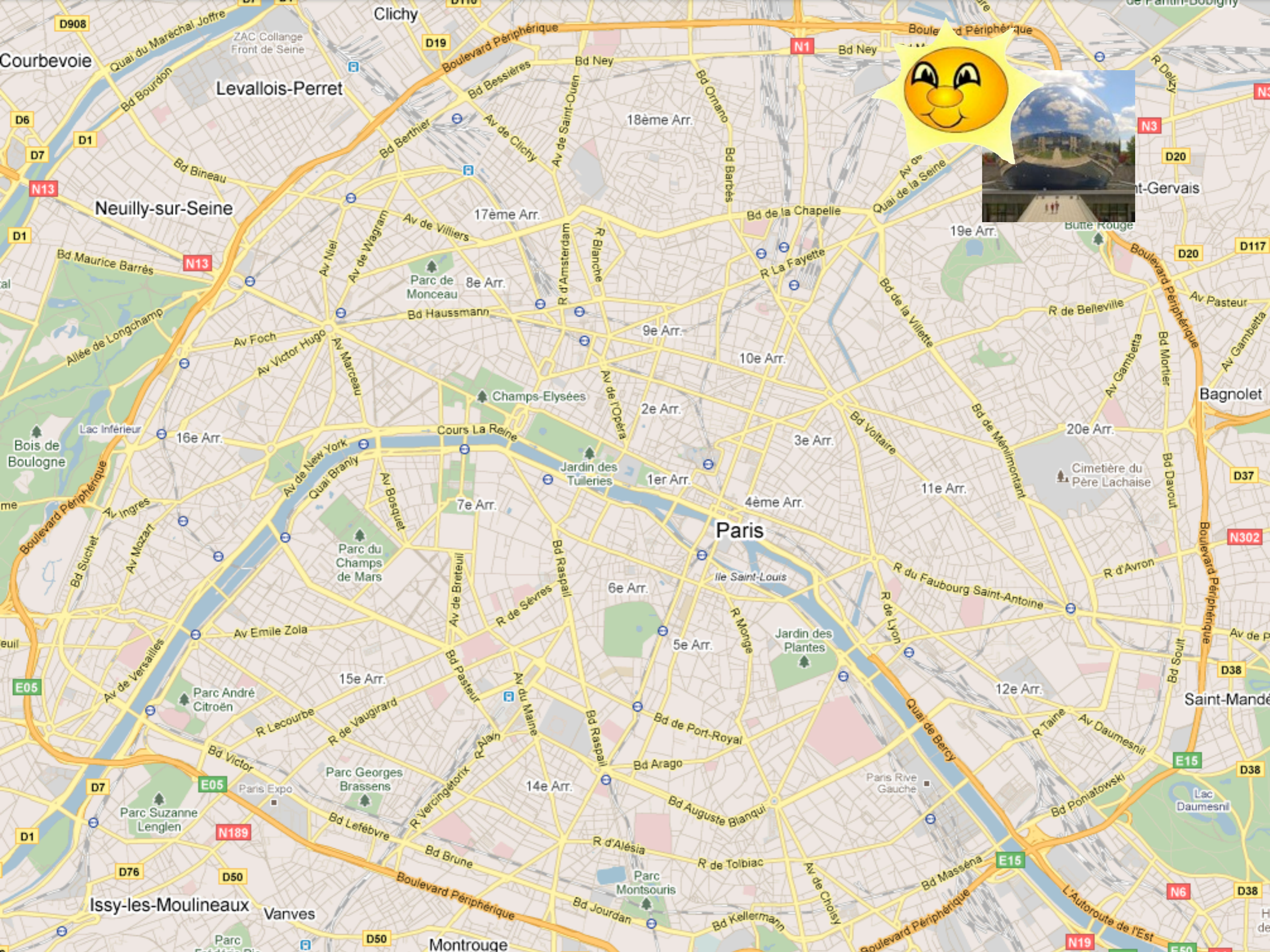




Systeme solaire : quelques heures-lumière
(Pas à l'échelle !)



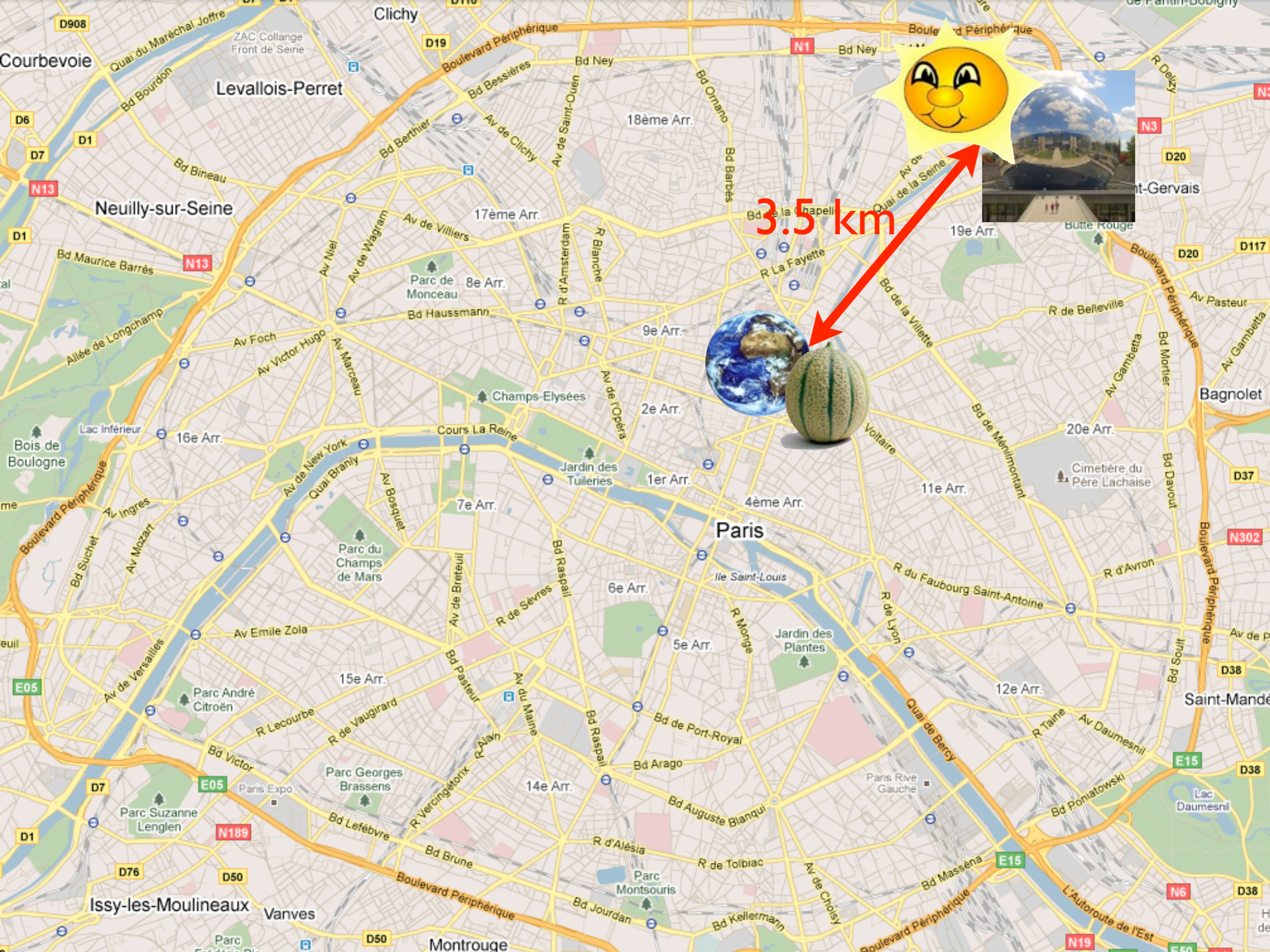






3.5 km





3.5 km



Paris

Levallois-Perret

Neully-sur-Seine

Courbevoie

Clichy

Issy-les-Moulineaux

Montrouge

Saint-Mandé

Bagnolet

18ème Arr.

17ème Arr.

8e Arr.

9e Arr.

2e Arr.

1er Arr.

4ème Arr.

11e Arr.

20e Arr.

Cours La Reine

Jardin des Tuileries

Jardin des Plantes

15e Arr.

14e Arr.

12e Arr.

Parc Suzanne Lenglen

Parc Georges Brassens

Parc Montsouris

Paris Rive Gauche

Lac Daumesnil

ZAC Collange Front de Seine

Parc de Monceau

Parc du Champs de Mars

Parc André Citroën

Bois de Boulogne

Cimetière du Père Lachaise

Paris Expo

Paris Rive Gauche

Lac Daumesnil

ZAC Collange Front de Seine

Parc de Monceau

Parc du Champs de Mars

Parc André Citroën

Bois de Boulogne

Cimetière du Père Lachaise

Paris Expo

Paris Rive Gauche

Lac Daumesnil





Elargir



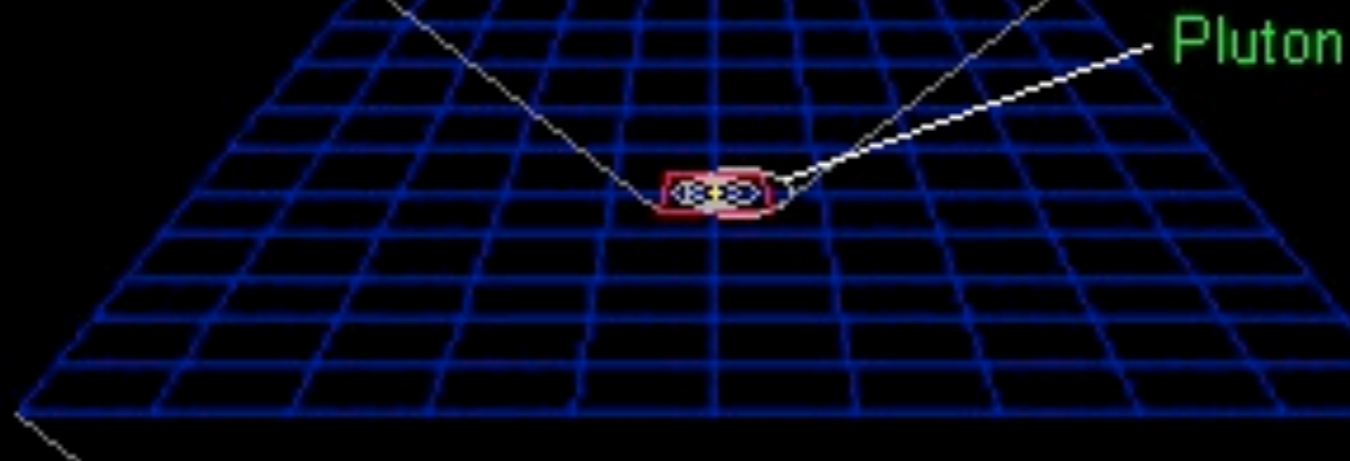
x10



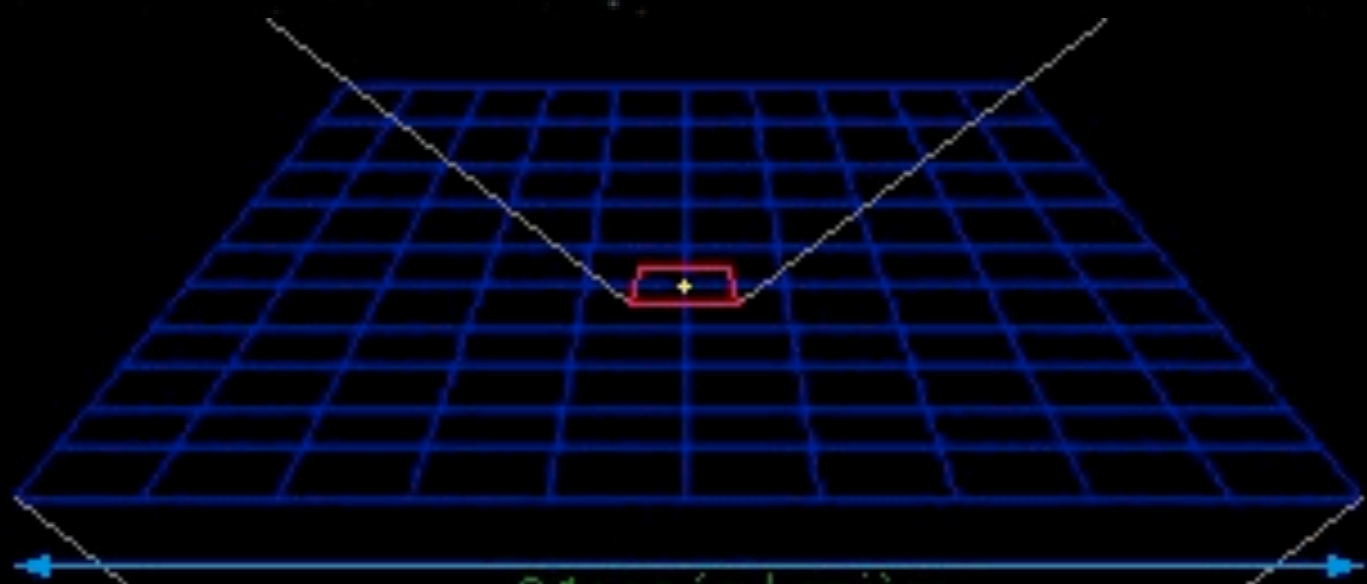
Elargir



x10



x10



Elargir

x10

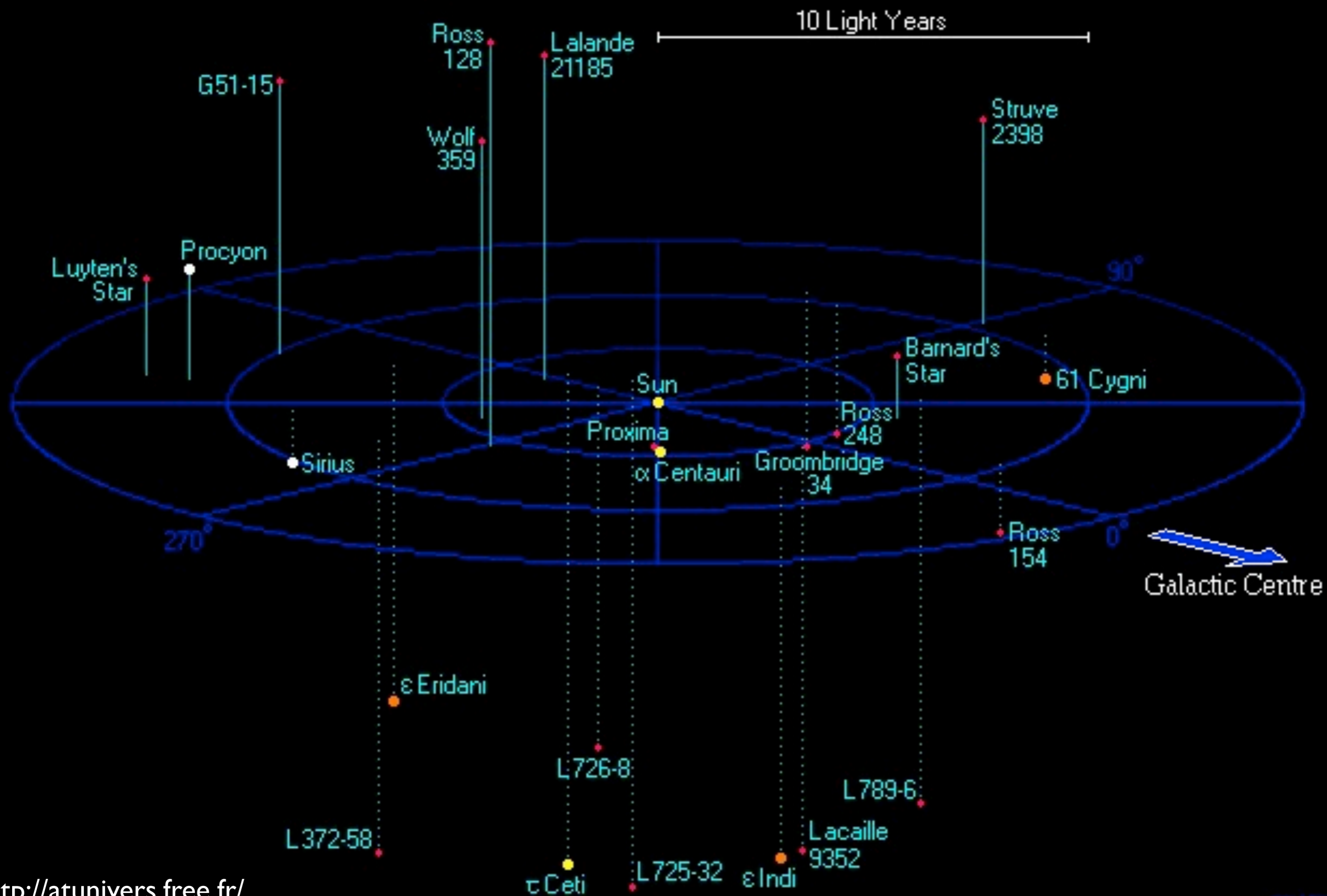


Elargir

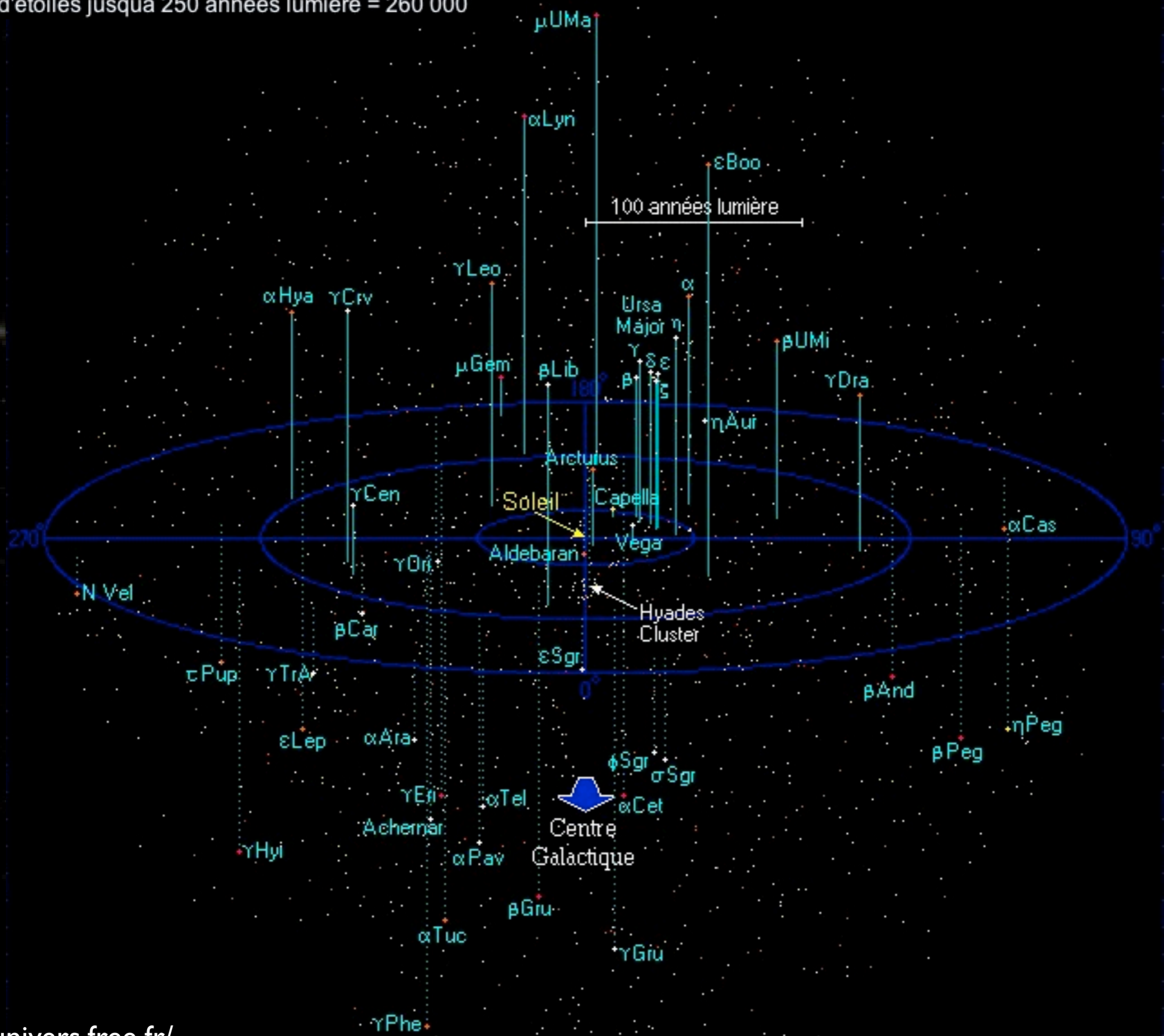
x10



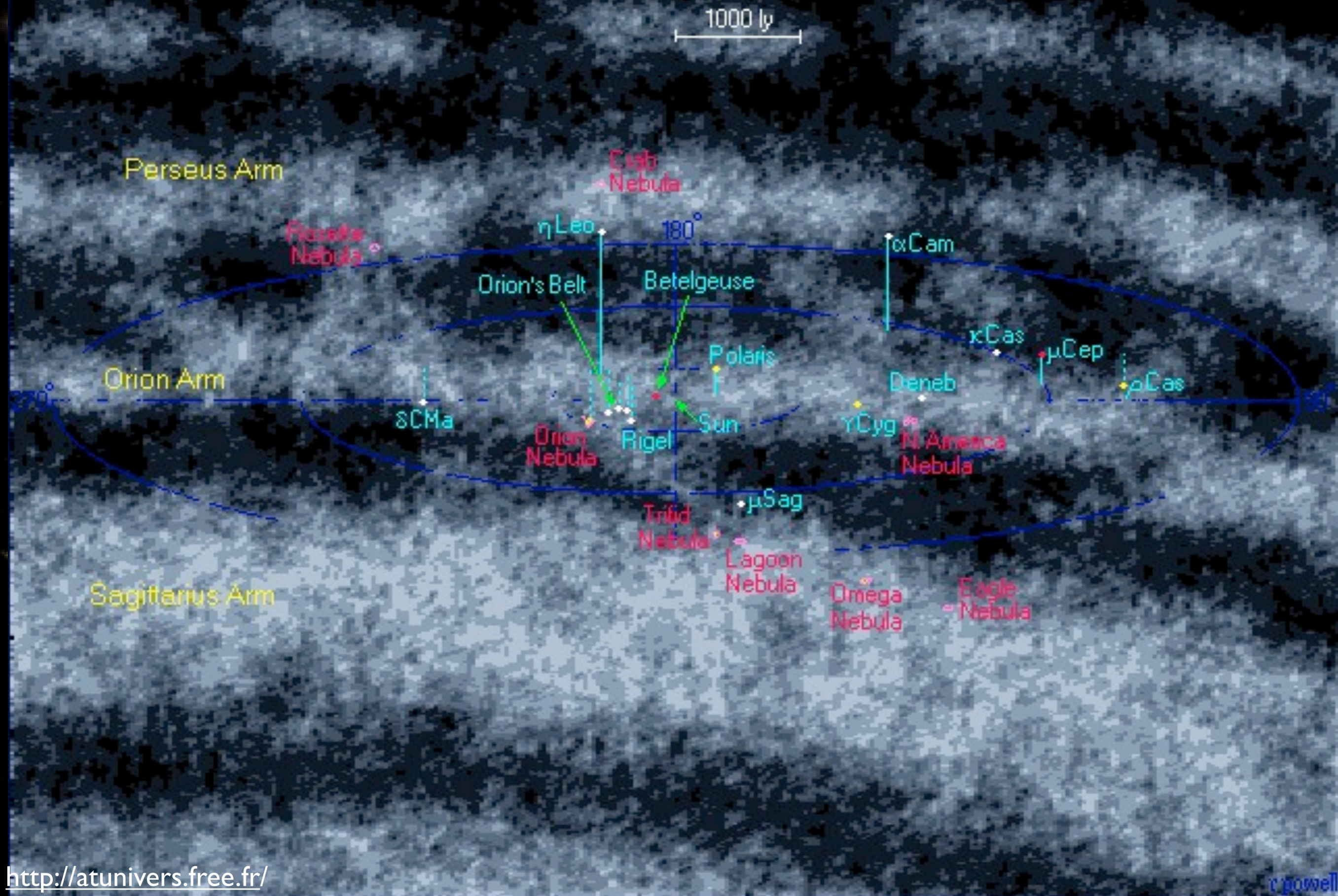
* Nombre d'étoiles jusqu'à 12.5 années lumière = 33



* Nombre d'étoiles jusqu'à 250 années lumière = 260 000

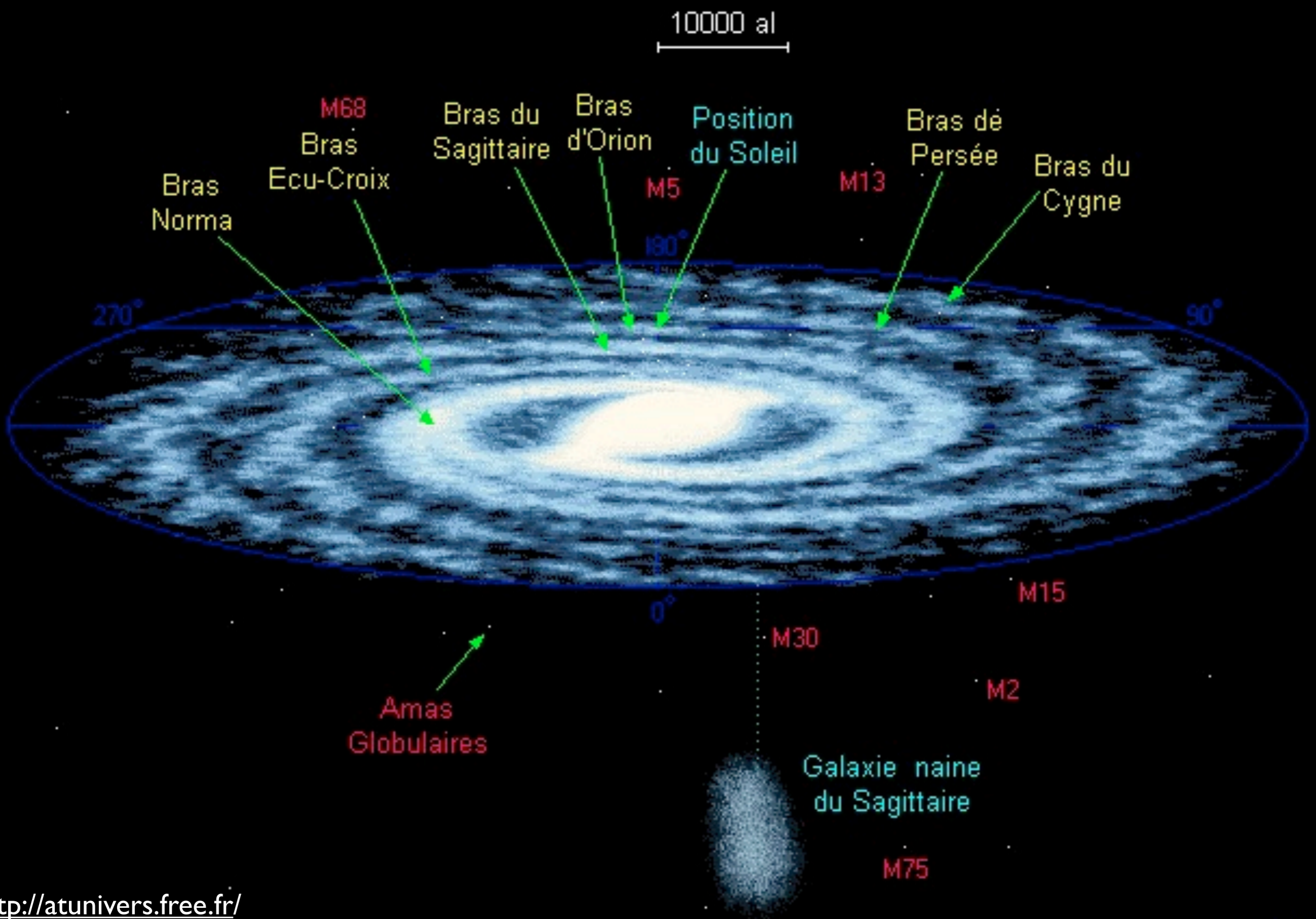


* Nombre d'étoiles jusqu'à 5000 années lumière = 600 million

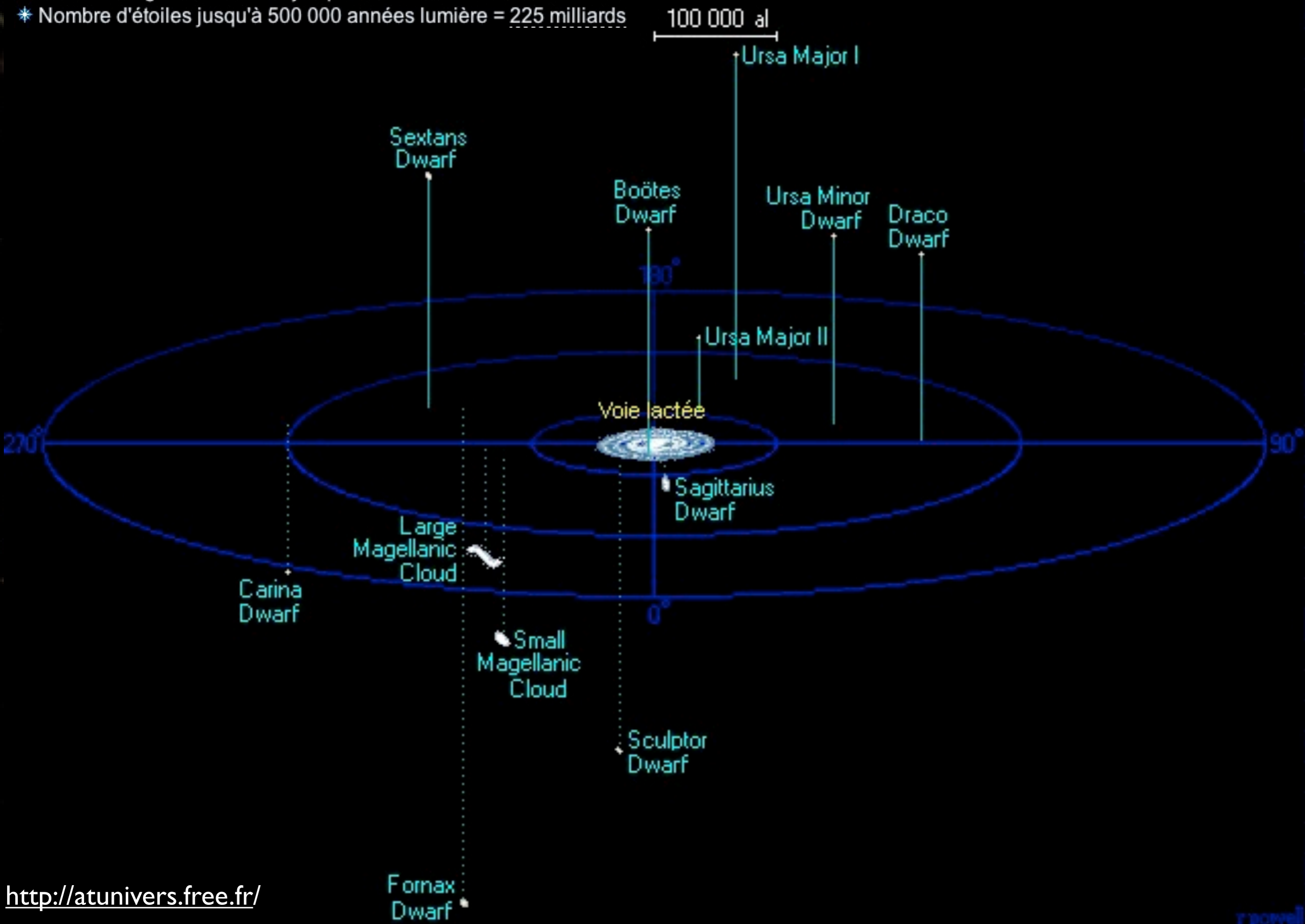


* Nombre d'étoiles jusqu'à 50 000 années lumière = 200 milliards

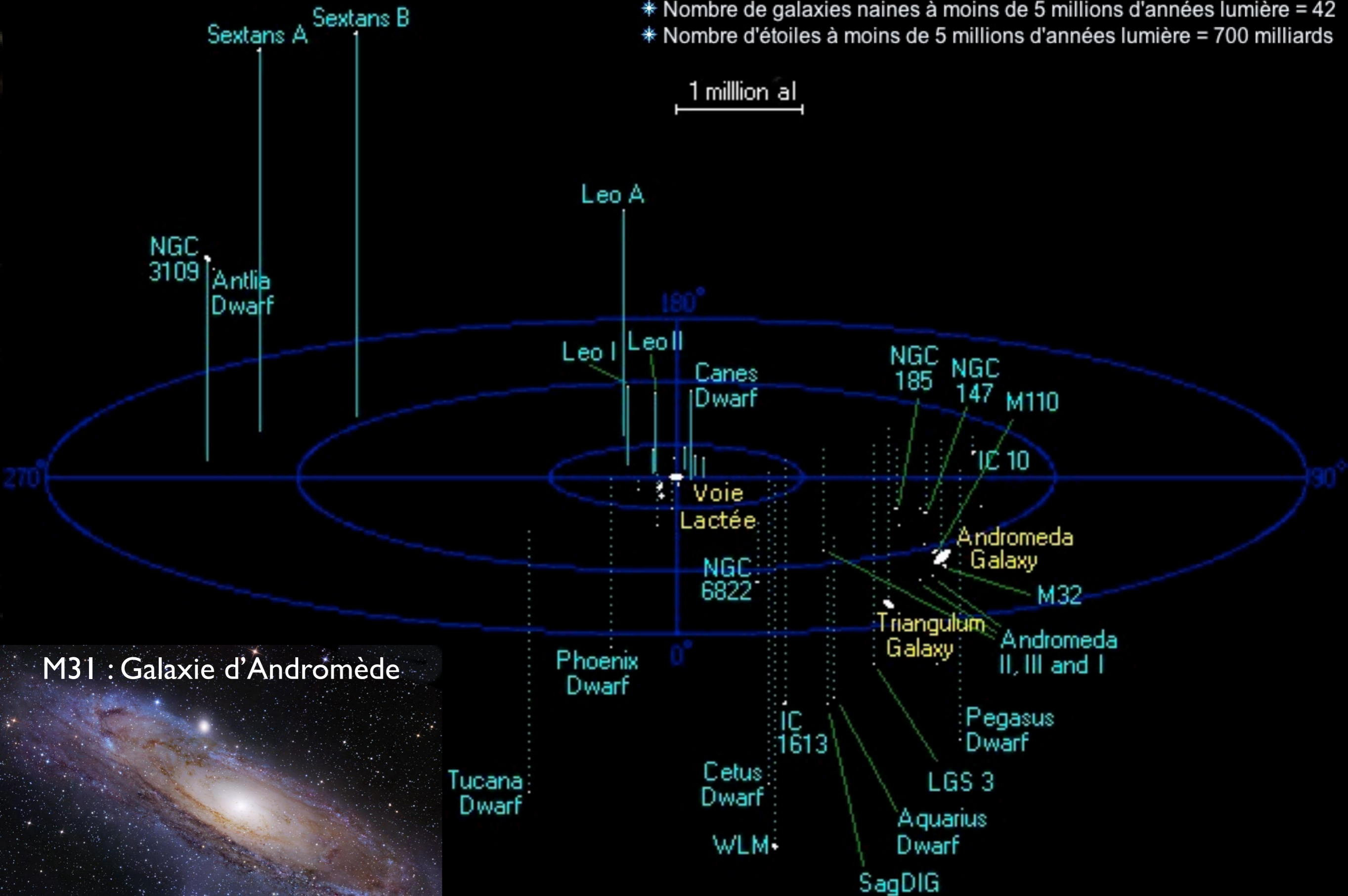
M3



- * Nombre de grandes galaxies jusqu'à 500 000 années lumière = 1
- * Nombre de galaxies naines jusqu'à 500 000 années lumière = 12
- * Nombre d'étoiles jusqu'à 500 000 années lumière = 225 milliards



- * Nombre de grandes galaxies à moins de 5 millions d'années lumière = 3
- * Nombre de galaxies naines à moins de 5 millions d'années lumière = 42
- * Nombre d'étoiles à moins de 5 millions d'années lumière = 700 milliards

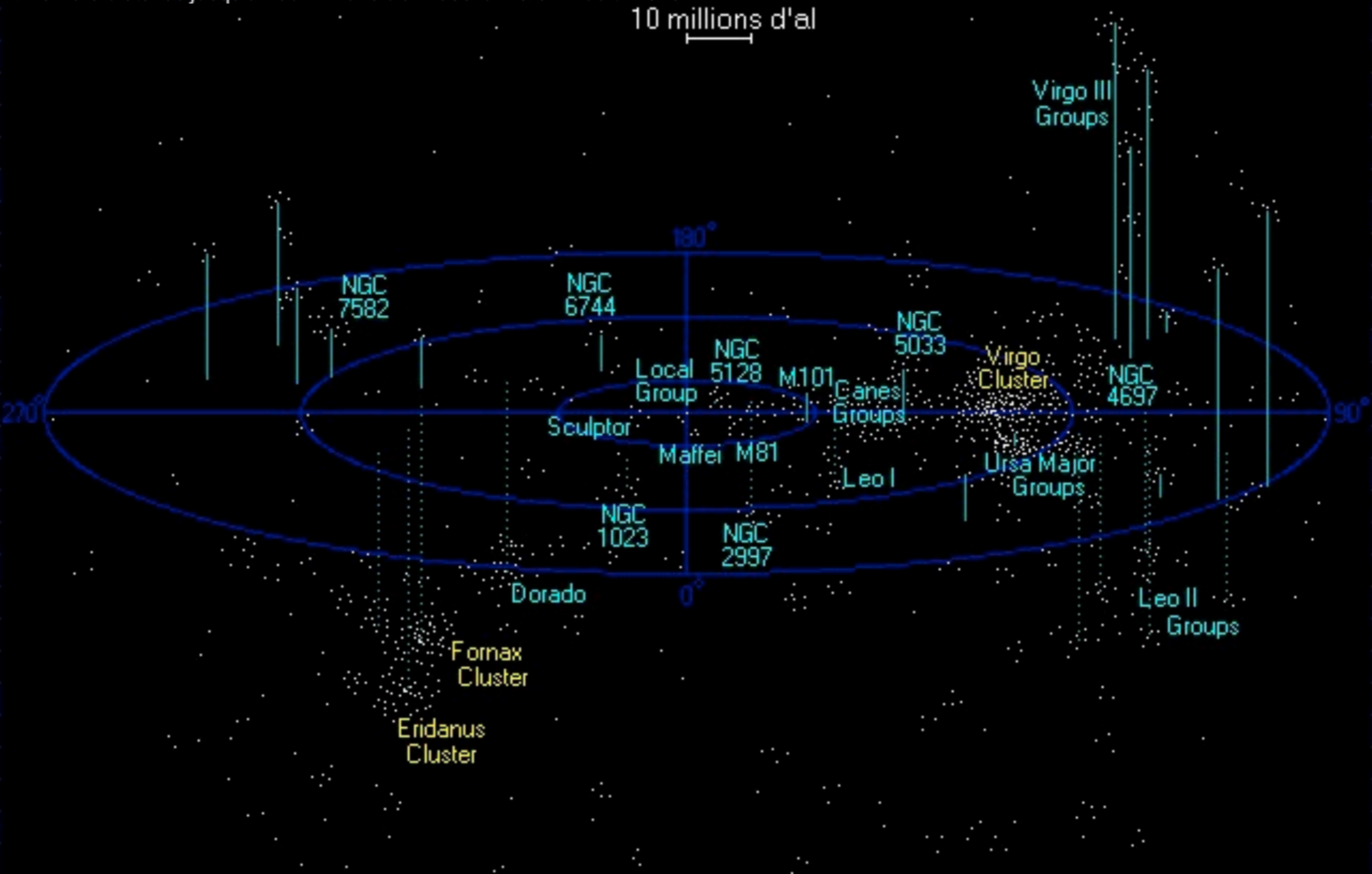


M31 : Galaxie d'Andromède



- * Nombre de groupes de galaxies jusqu'à 100 millions d'années lumière = 200
- * Nombre de grandes galaxies jusqu'à 100 millions d'années lumière = 2500
- * Nombre de galaxies naines jusqu'à 100 millions d'années lumière = 50000
- * Nombre d'étoiles jusqu'à 100 millions d'années lumière = 200 trillions

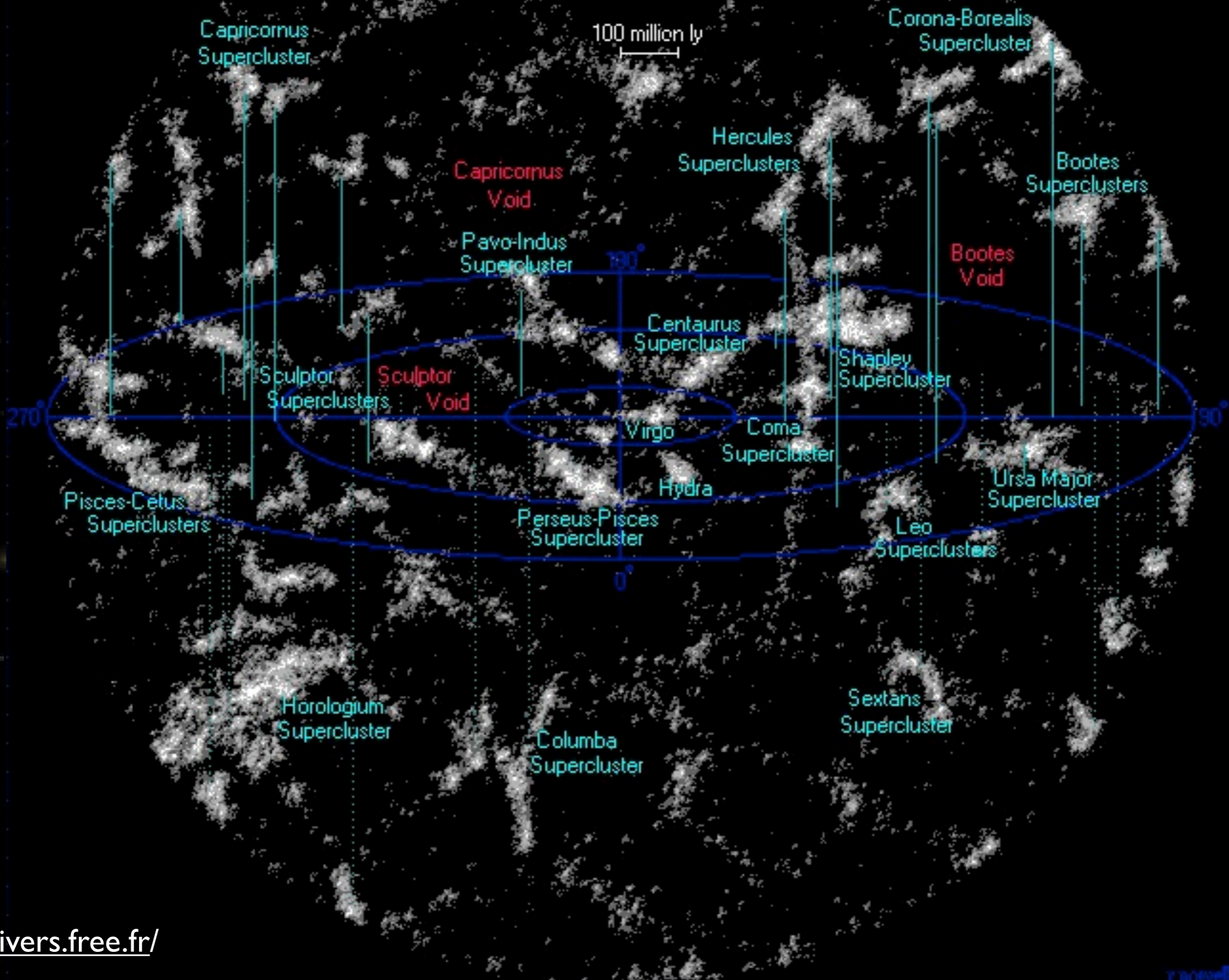
10 millions d'al



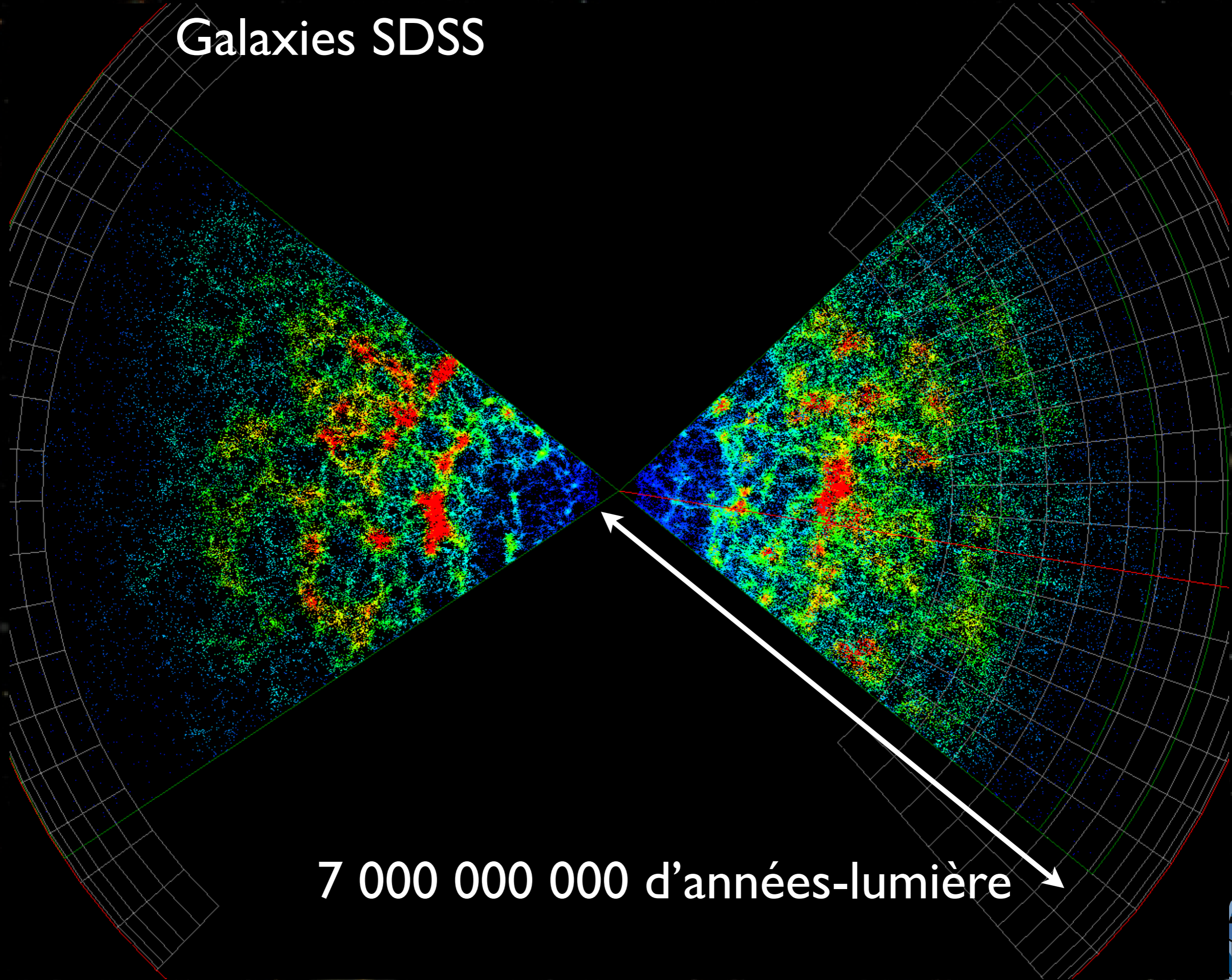
Amas de galaxies



- * Nombre de superamas jusqu'à 1 milliard d'années lumière = 100
- * Nombre de groupes galactiques jusqu'à 1 milliard d'années lumière = 240 000
- * Nombre de grande galaxies jusqu'à 1 milliard d'années lumière = 3 millions
- * Nombre de galaxies naines jusqu'à 1 milliard d'années lumière = 60 millions
- * Nombre d'étoiles jusqu'à 1 milliard d'années lumière = 250 000 trillions



Galaxies SDSS

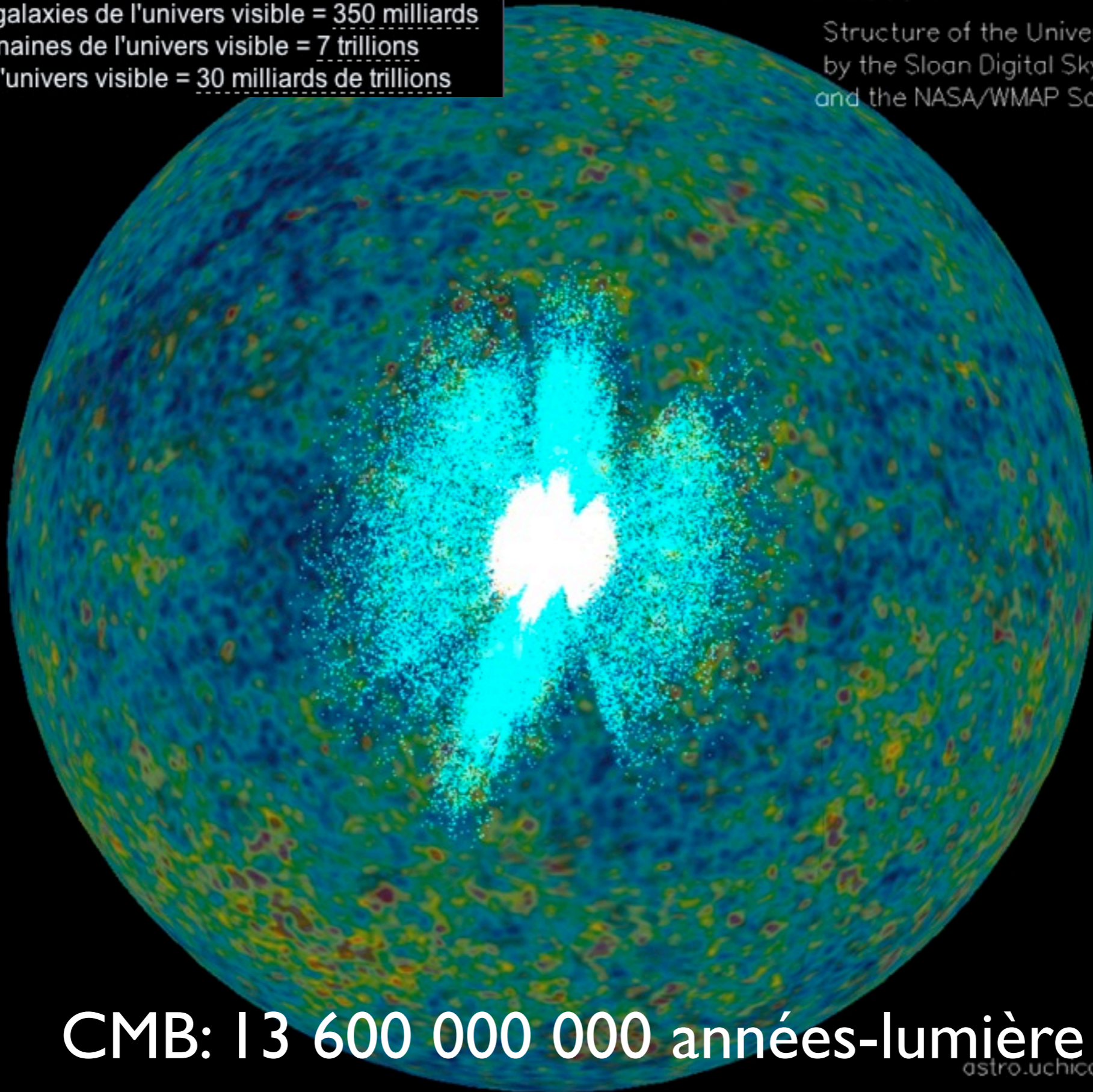


7 000 000 000 d'années-lumière



- *Nombre de superamas de l'univers visible = 10 millions
- *Nombre de groupes de galaxies de l'univers visible = 25 milliards
- *Nombre de grandes galaxies de l'univers visible = 350 milliards
- *Nombre de galaxies naines de l'univers visible = 7 trillions
- *Nombre d'étoiles de l'univers visible = 30 milliards de trillions

Structure of the Universe as found
by the Sloan Digital Sky Survey
and the NASA/WMAP Science Team



CMB: 13 600 000 000 années-lumière



astro.uchicago.edu/cosmus



Plan du cours

- Cours I : Une vue d'ensemble de la cosmologie

- ★ Les échelles en cosmologie

- ★ Les piliers de la cosmologie

- Relativité Générale (quelques mots)
- Expansion de l'Univers, modèle du Big Bang
- Principe cosmologique

- ★ L'Univers de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

- Métrique FLRW
- Redshift, taux d'expansion
- Équations de Friedman
- Densités des espèces composant l'Univers
- Expansion lors de diverses ères
- Quelques mots sur le «Big Bang» ...

- ★ F.A.Q. de cosmologie

- ★ Histoire «thermique» de l'Univers

- Transitions de phase
- Nucléosynthèse primordiale
- Égalité matière-rayonnement
- Découplage matière-rayonnement
- Pic acoustique des baryons
- Formation des structures
- Ré-ionisation
- premières étoiles, galaxies, supernovae ...



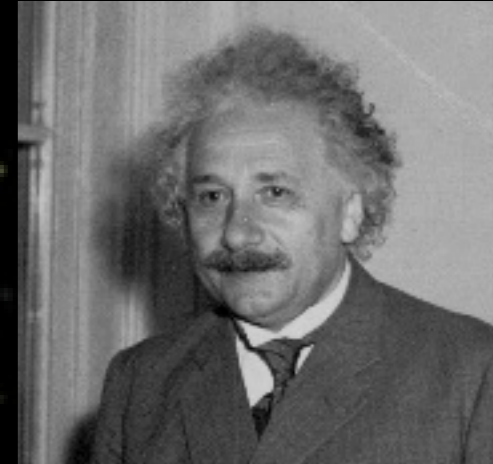
Les piliers de la cosmologie

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



un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

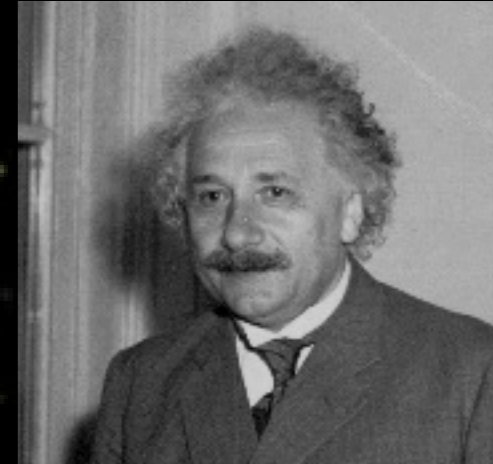


A. Einstein

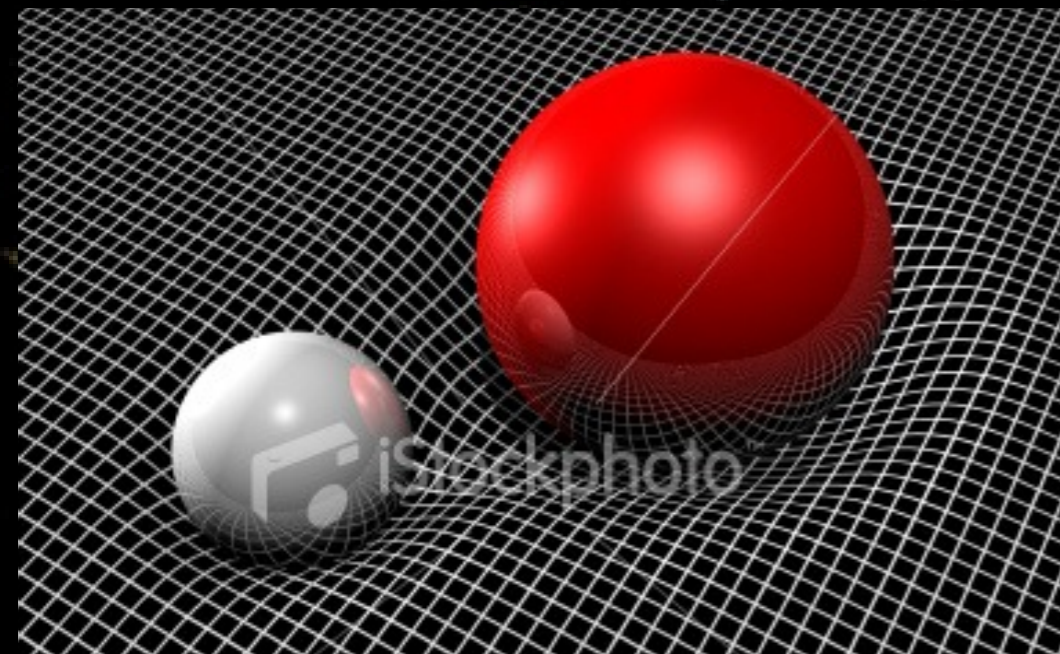


un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

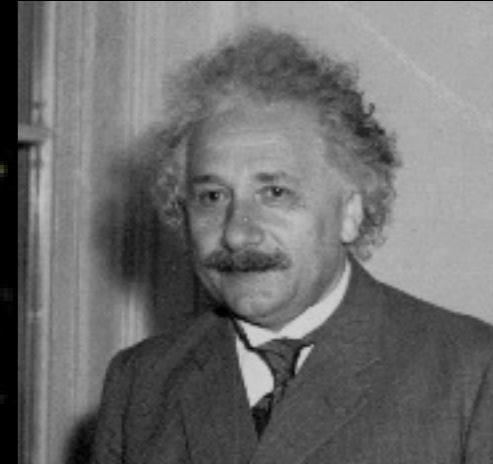


A. Einstein

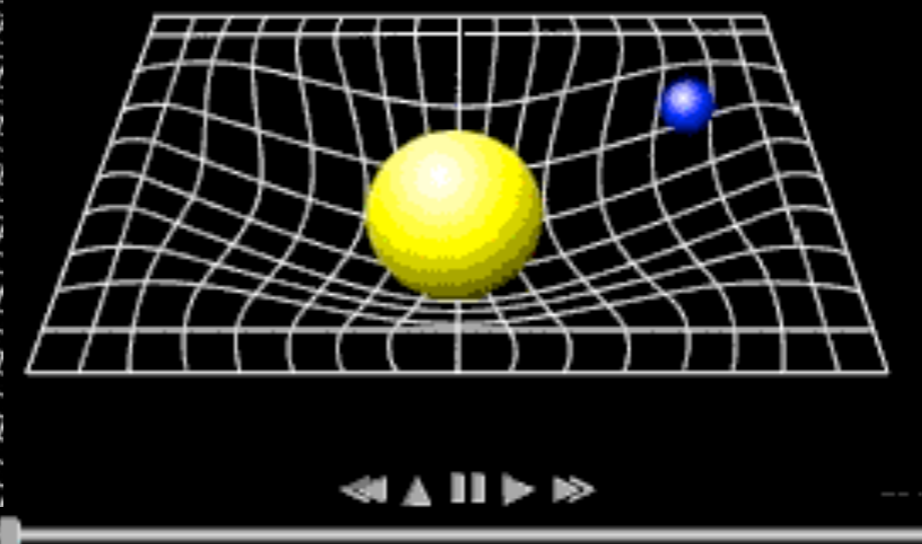
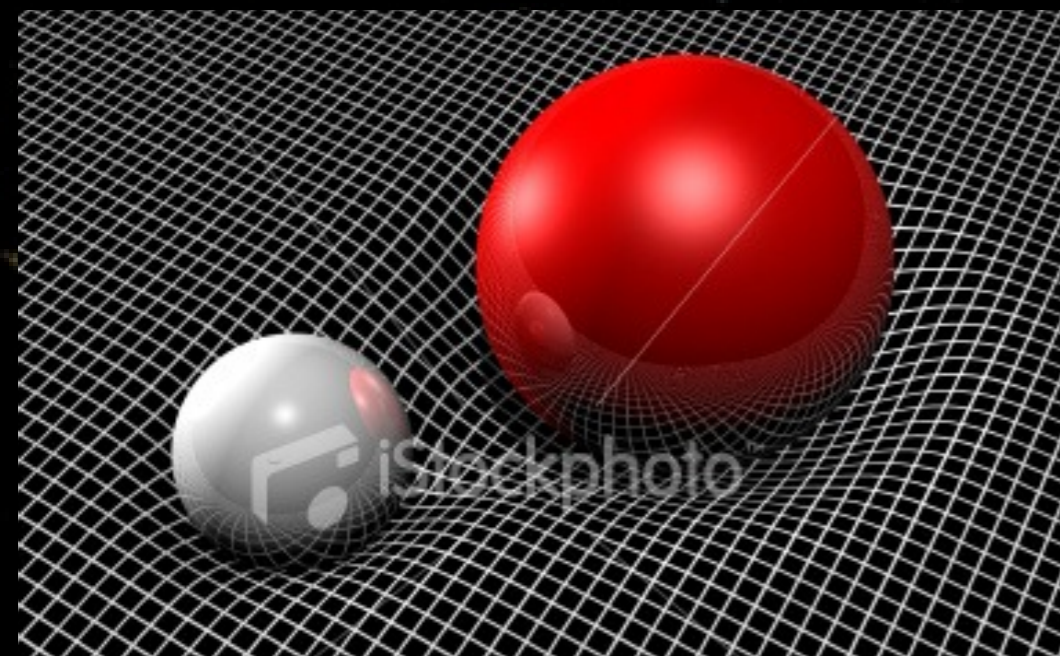


un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

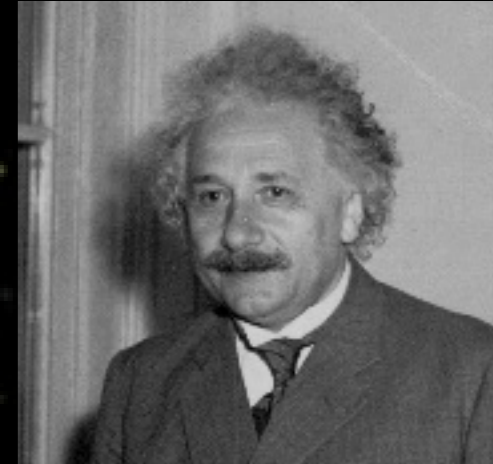


A. Einstein

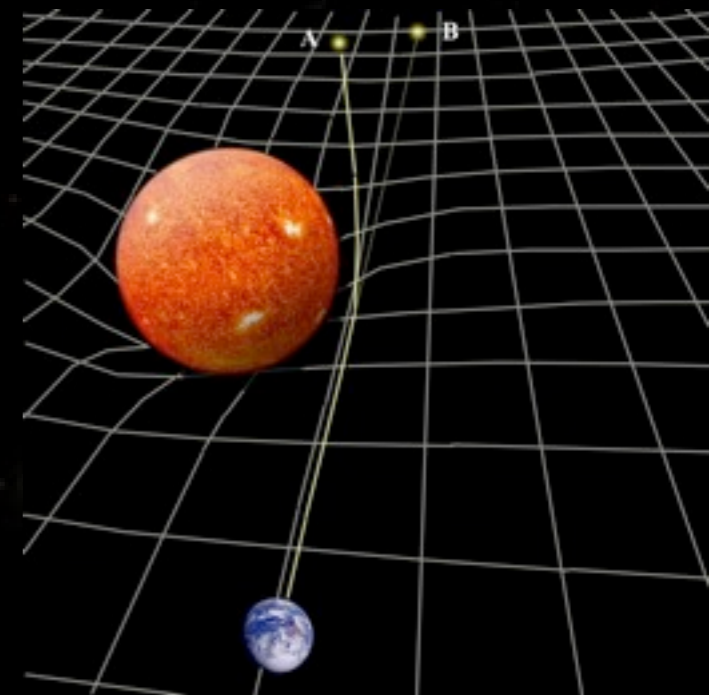
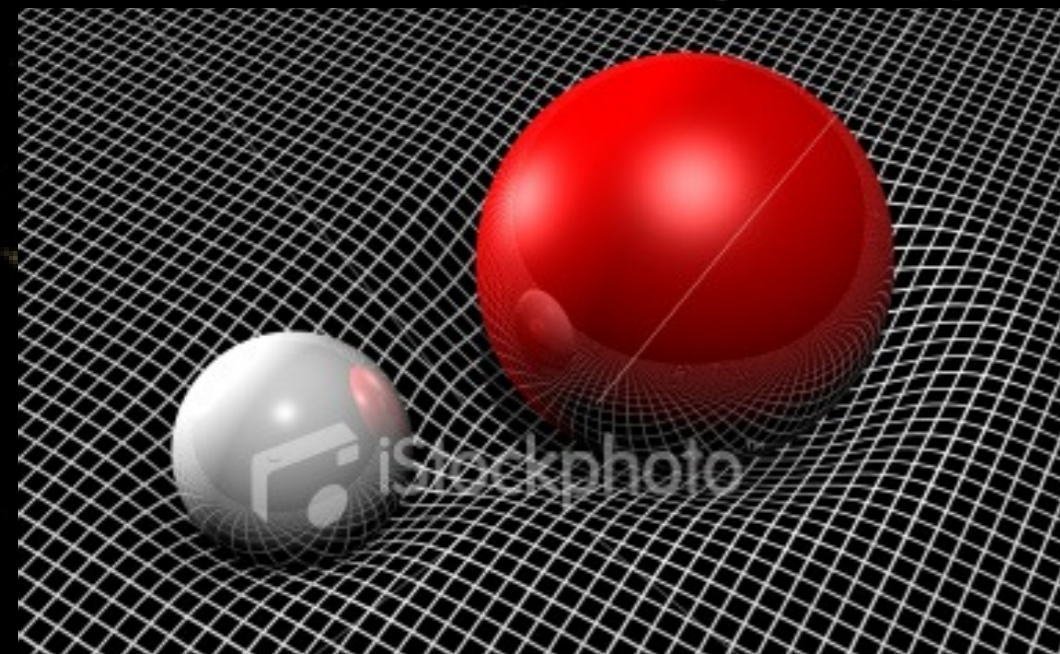


un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger



A. Einstein



Relativité Générale

- Théorie qui décrit l'espace temps de manière géométrique

- ★ Géométrie différentielle : description des «variétés possédant une courbure»

- ★ Au centre de cette description : l'élément de distance :

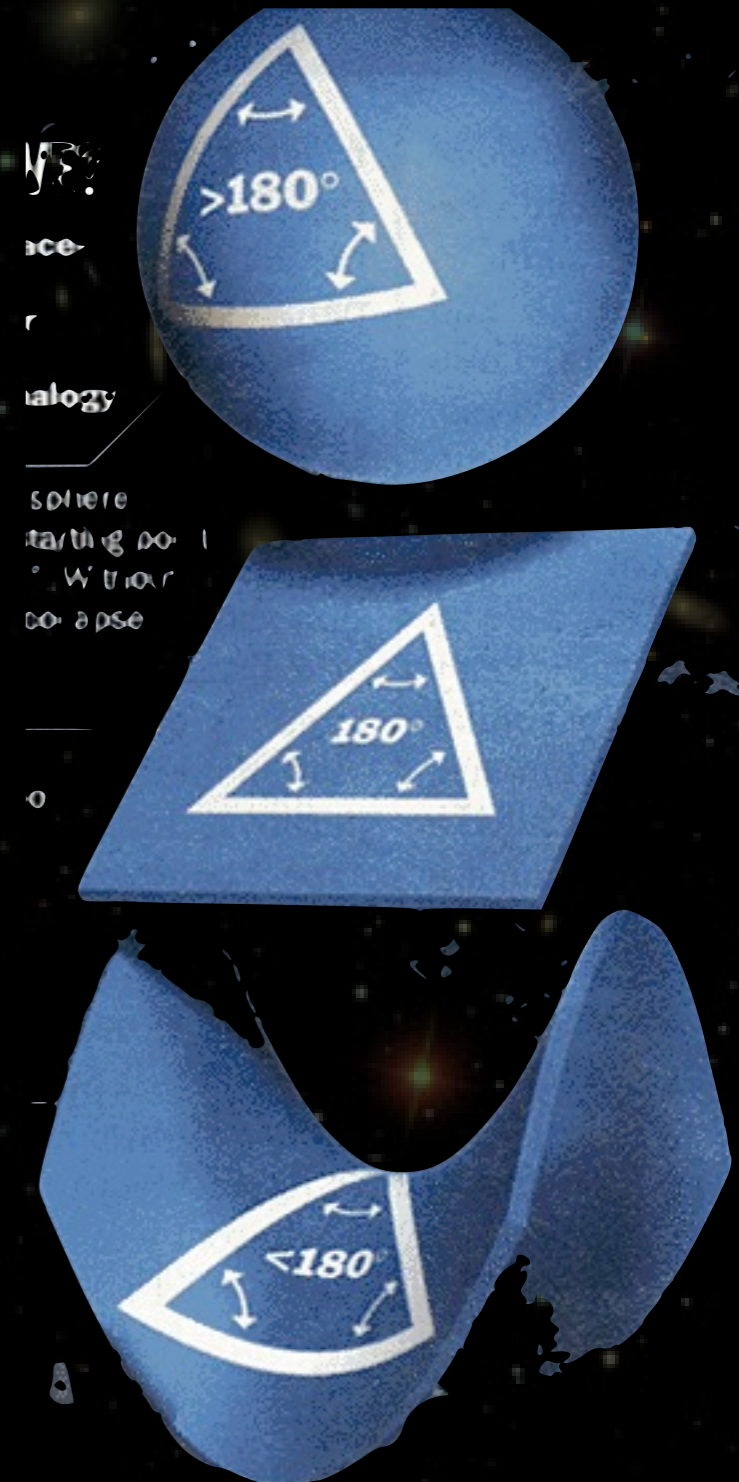
- Géométrie Euclidienne : $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

- Géométrie non Euclidienne : $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

- ★ L'inconnue de la RG: la métrique $g_{\mu\nu}$

- ★ L'équation d'Einstein exprime sa dépendance par rapport au contenu matériel de l'espace-temps

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$



Relativité Générale

- Théorie qui décrit l'espace temps de manière géométrique

- ★ Géométrie différentielle : description des «variétés possédant une courbure»

- ★ Au centre de cette description : l'élément de distance :

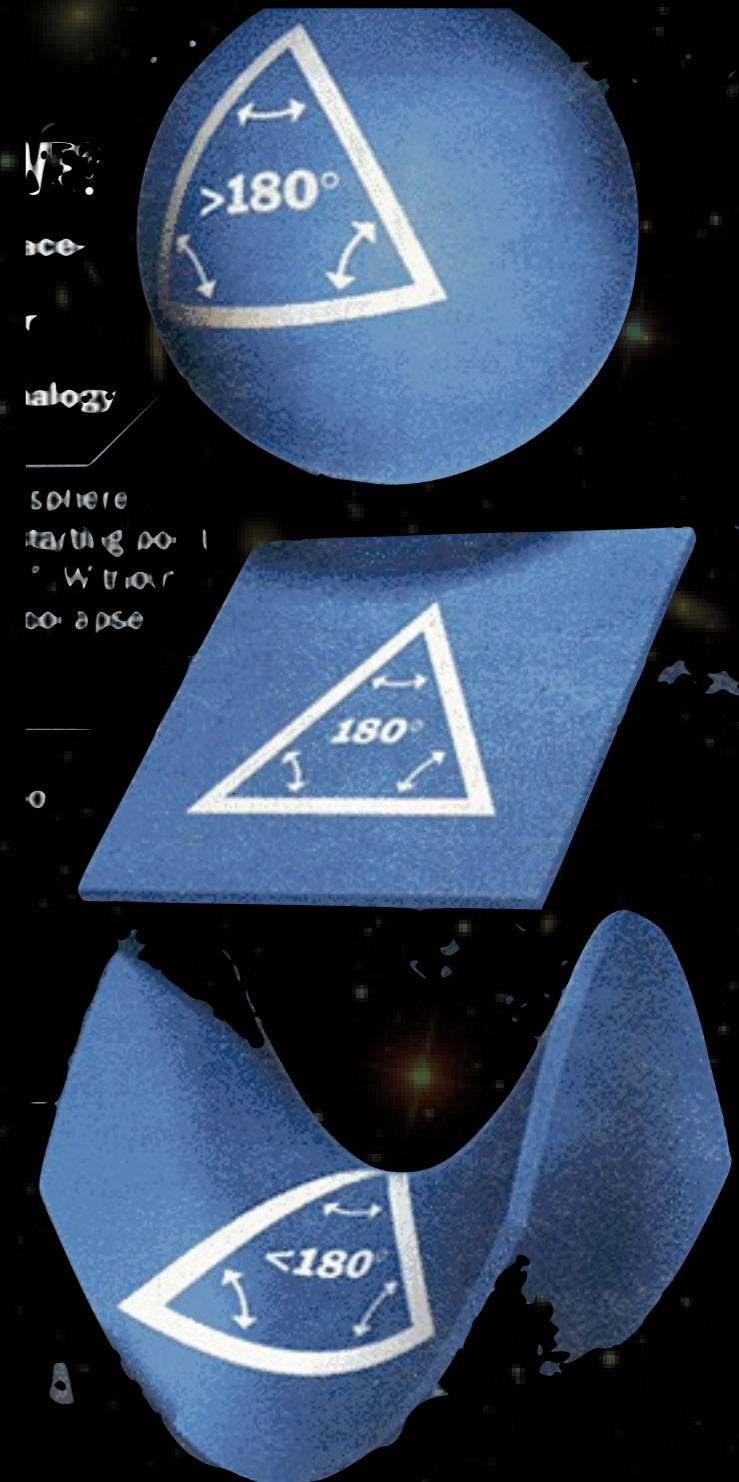
- Géométrie Euclidienne : $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

- Géométrie non Euclidienne : $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

- ★ L'inconnue de la RG: la métrique $g_{\mu\nu}$

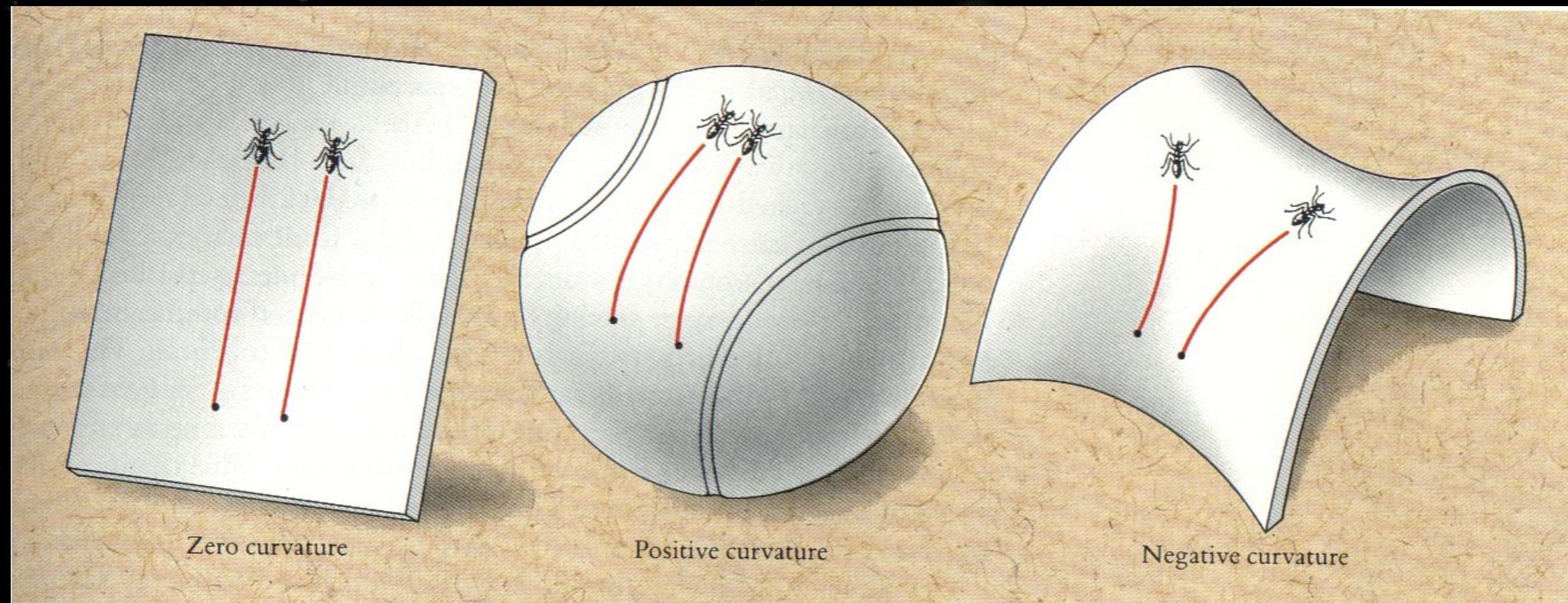
- ★ L'équation d'Einstein exprime sa dépendance par rapport au contenu matériel de l'espace-temps

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{Espace-temps}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}}_{\text{Contenu matériel}}$$



RG et cosmologie

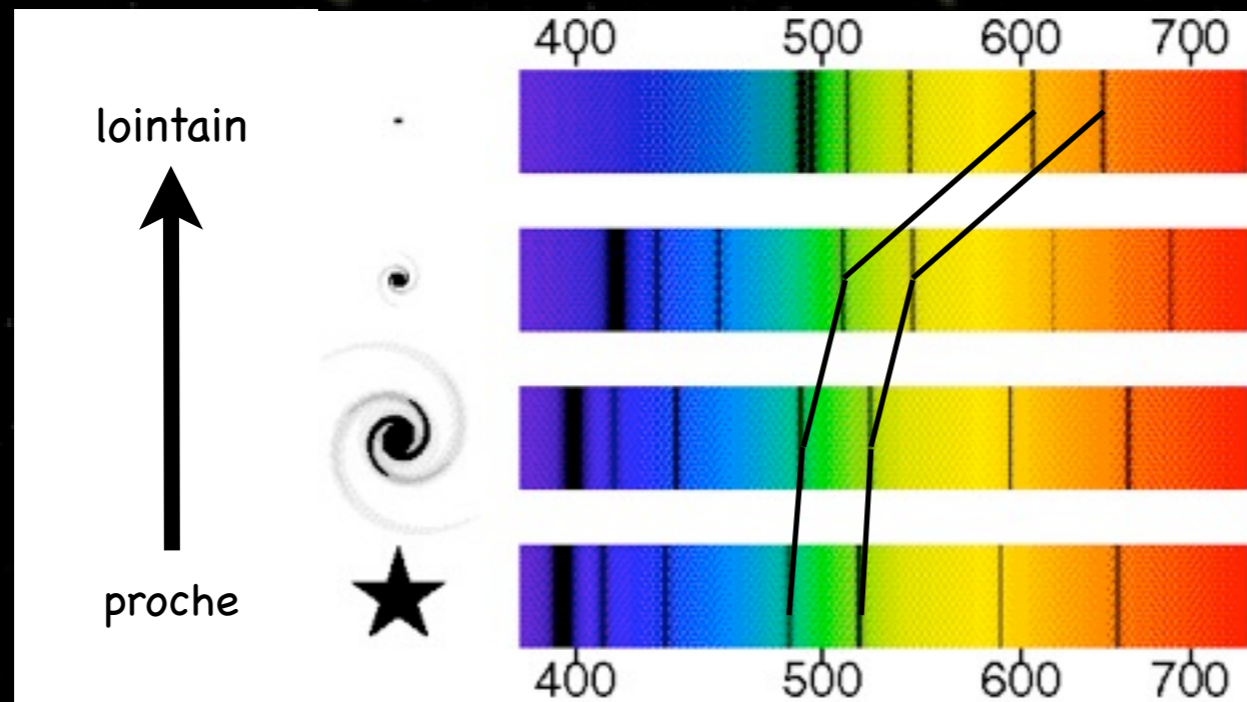
- L'Univers possède une courbure globale



- En appliquant les équations d'Einstein à la métrique de l'Univers, on peut en prédire l'évolution en fonction de son contenu

L'Univers en expansion

- E. Hubble (1929) :
 - Le décalage vers le rouge des galaxies est proportionnel à leur distance



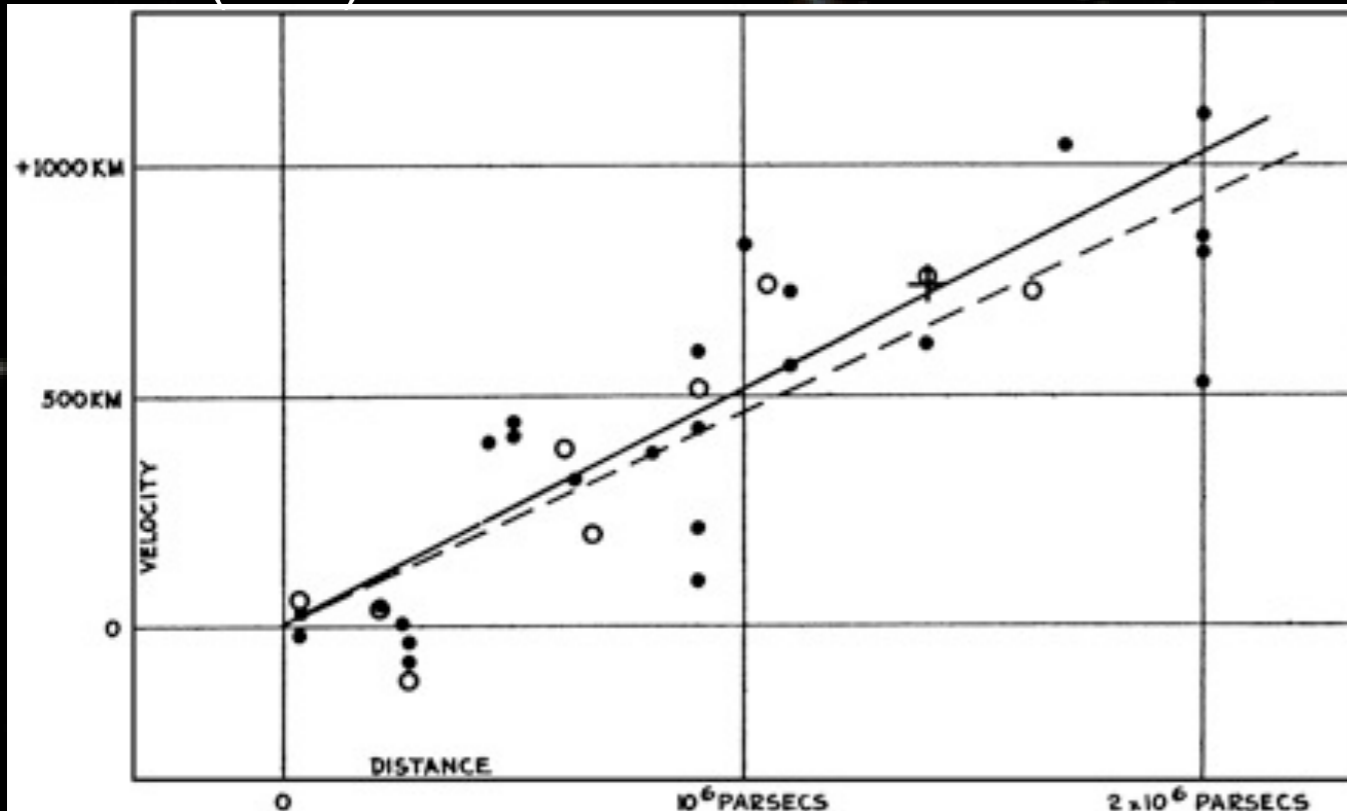
- Si ce décalage vers le rouge est interprété comme un effet Doppler :
 - La vitesse radiale des galaxies est proportionnelle à leur distance : loi de Hubble $v = H_0 \times d$



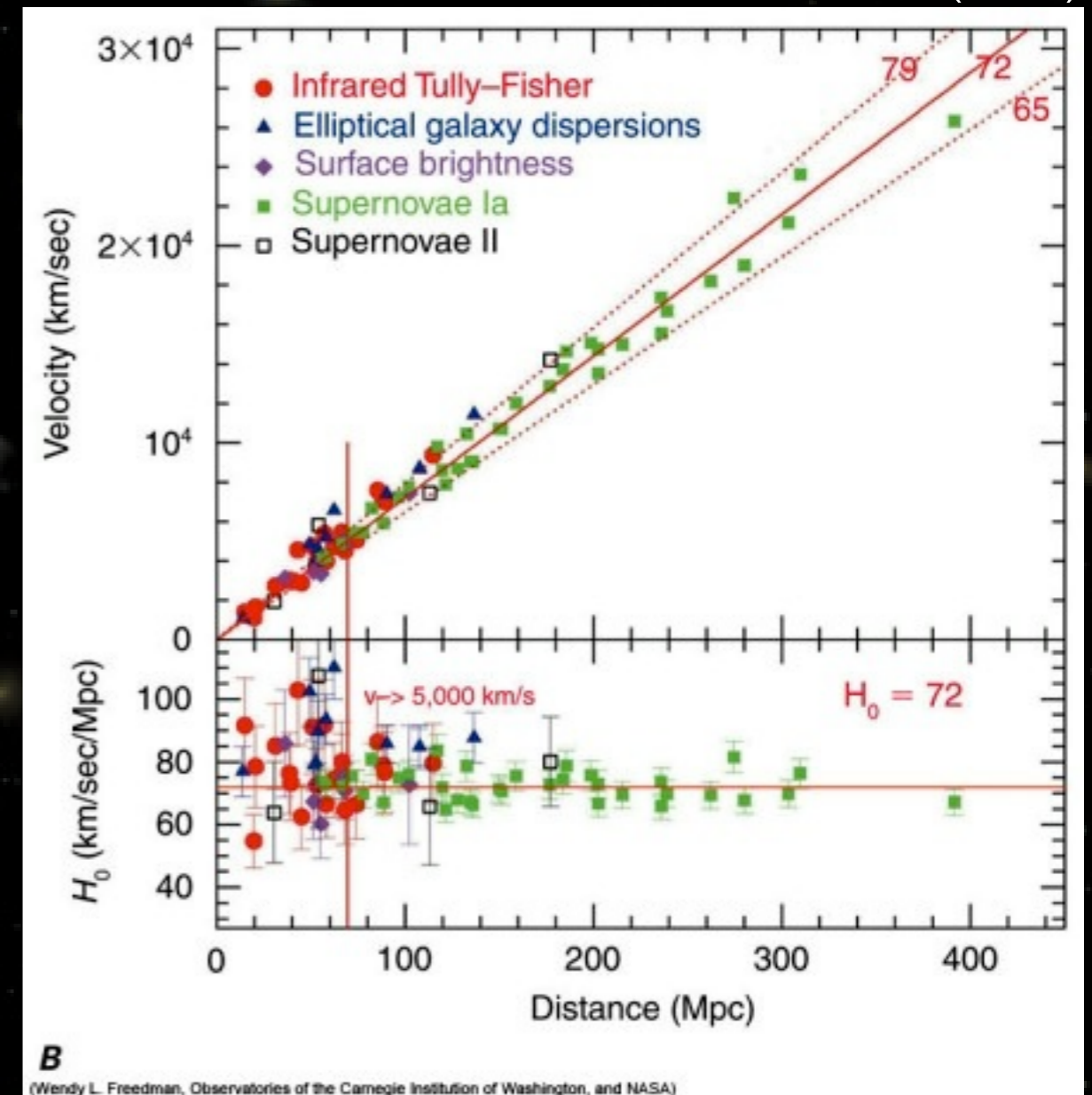
La constante de Hubble

Freedman et al. (2001)

Hubble (1929)



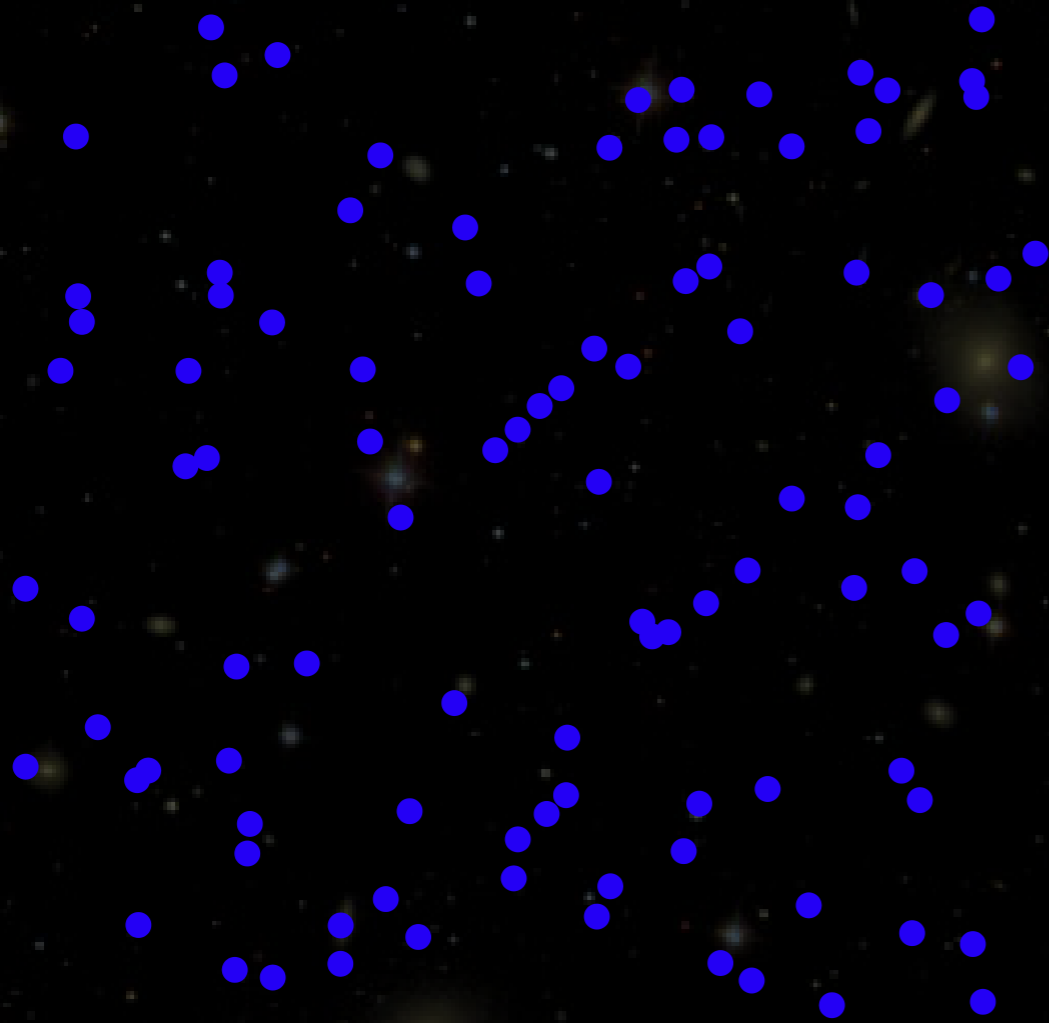
$H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$



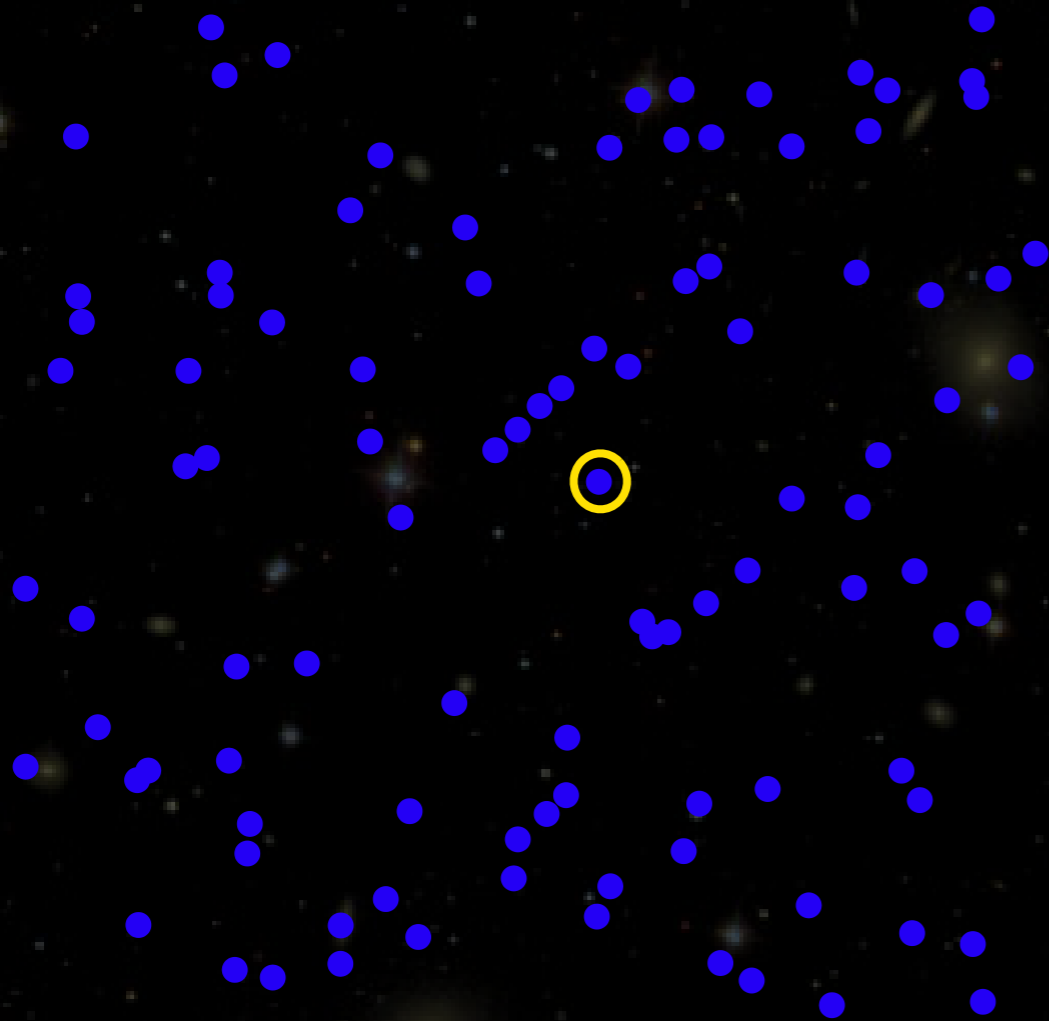
$H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$



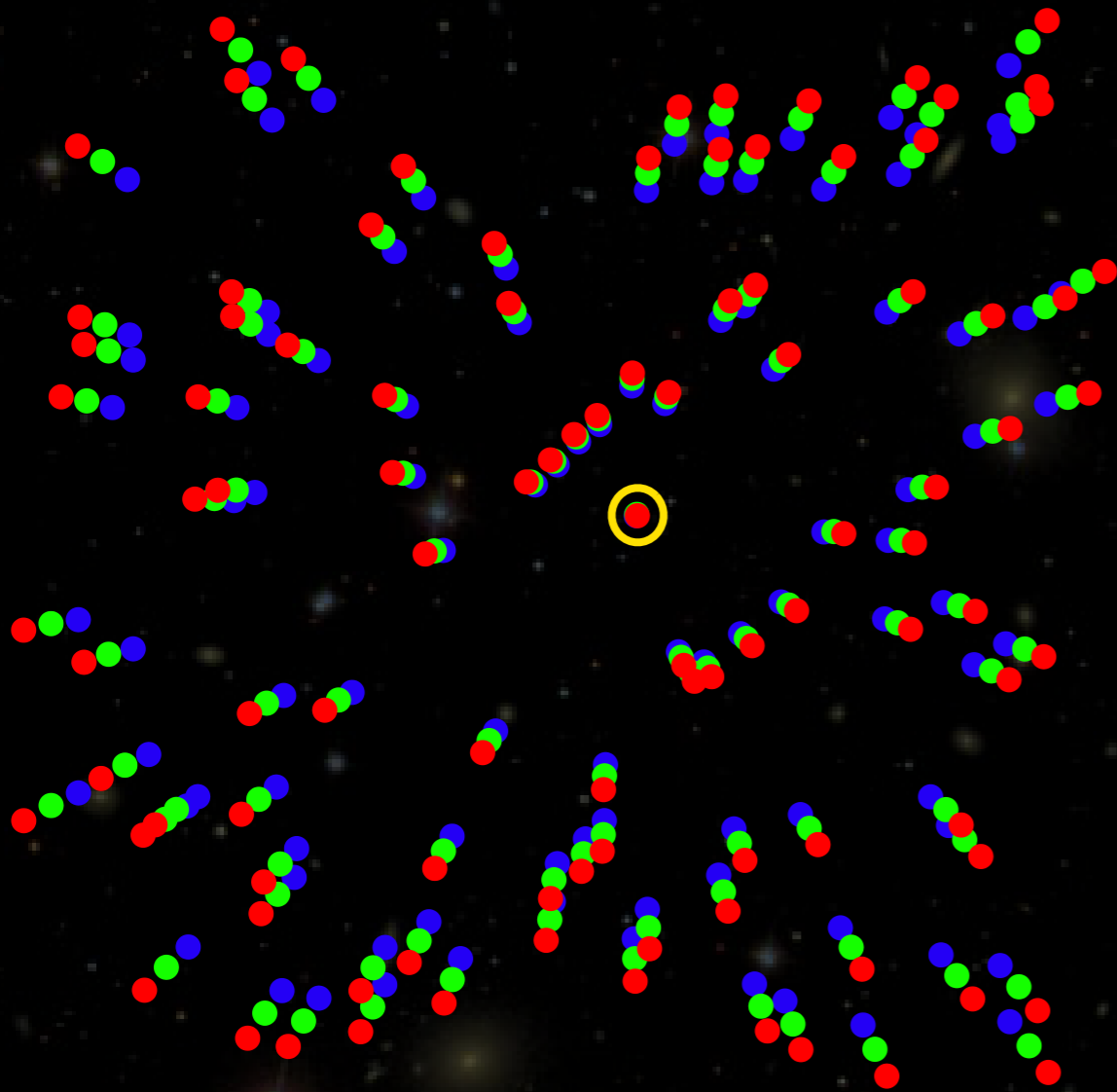
L'expansion est globale



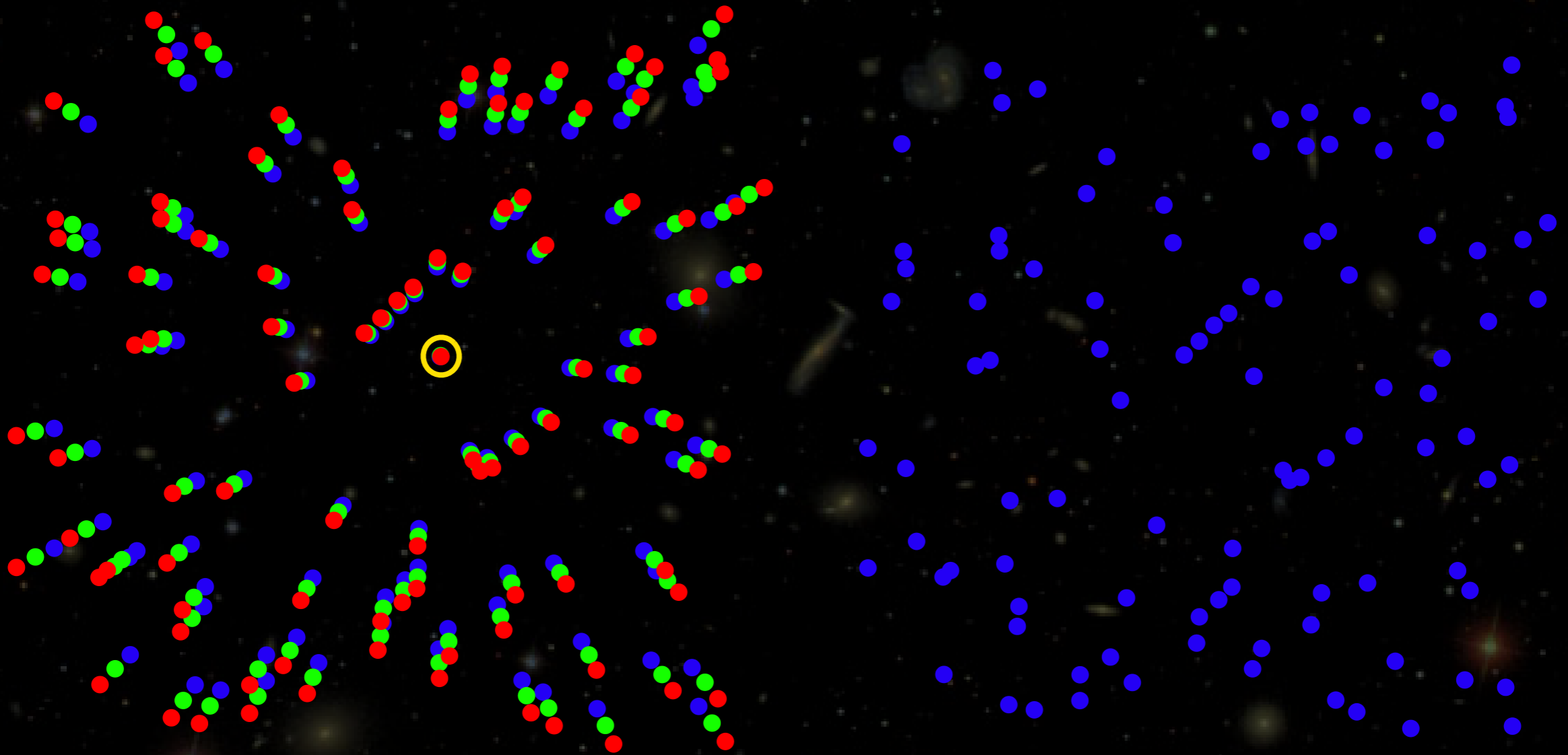
L'expansion est globale



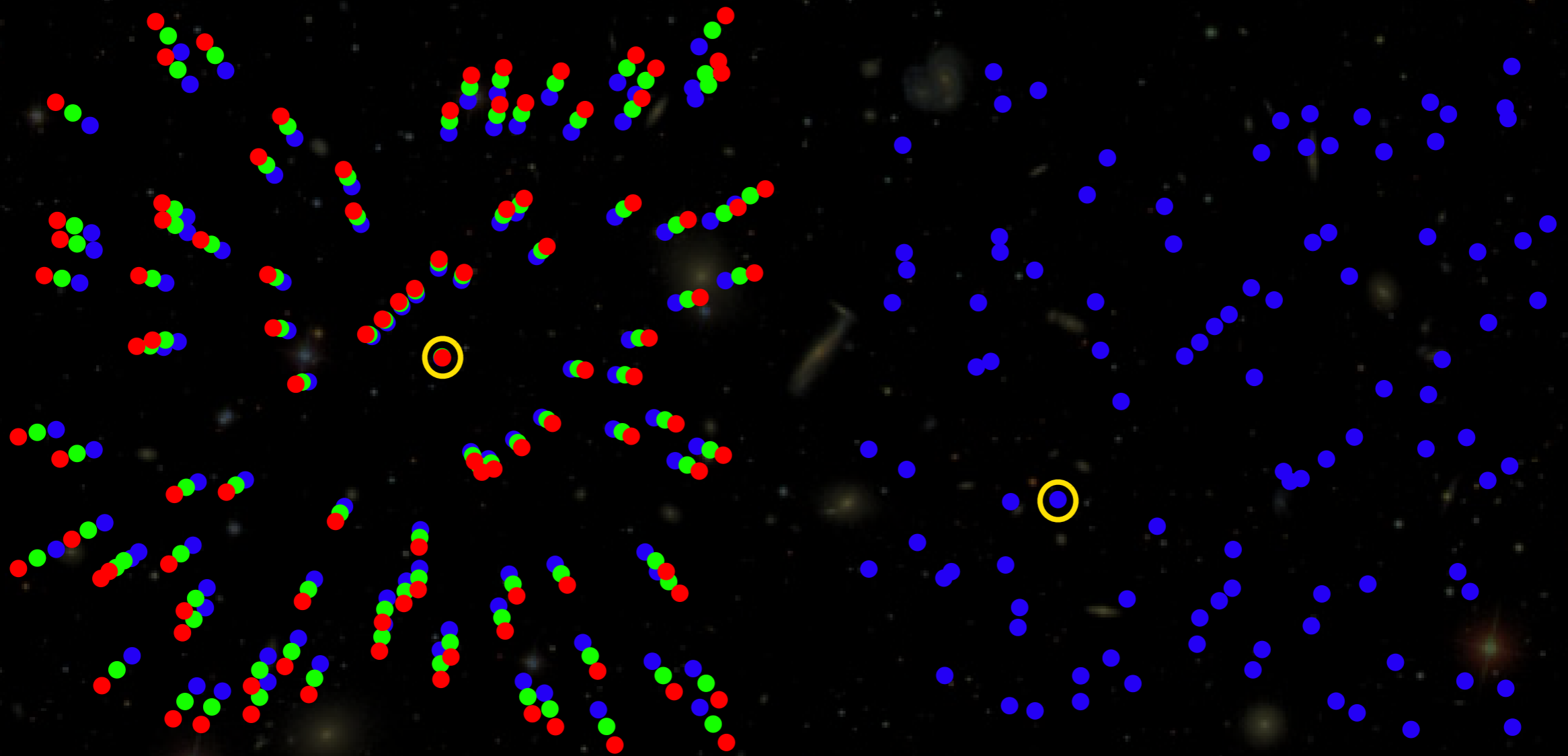
L'expansion est globale



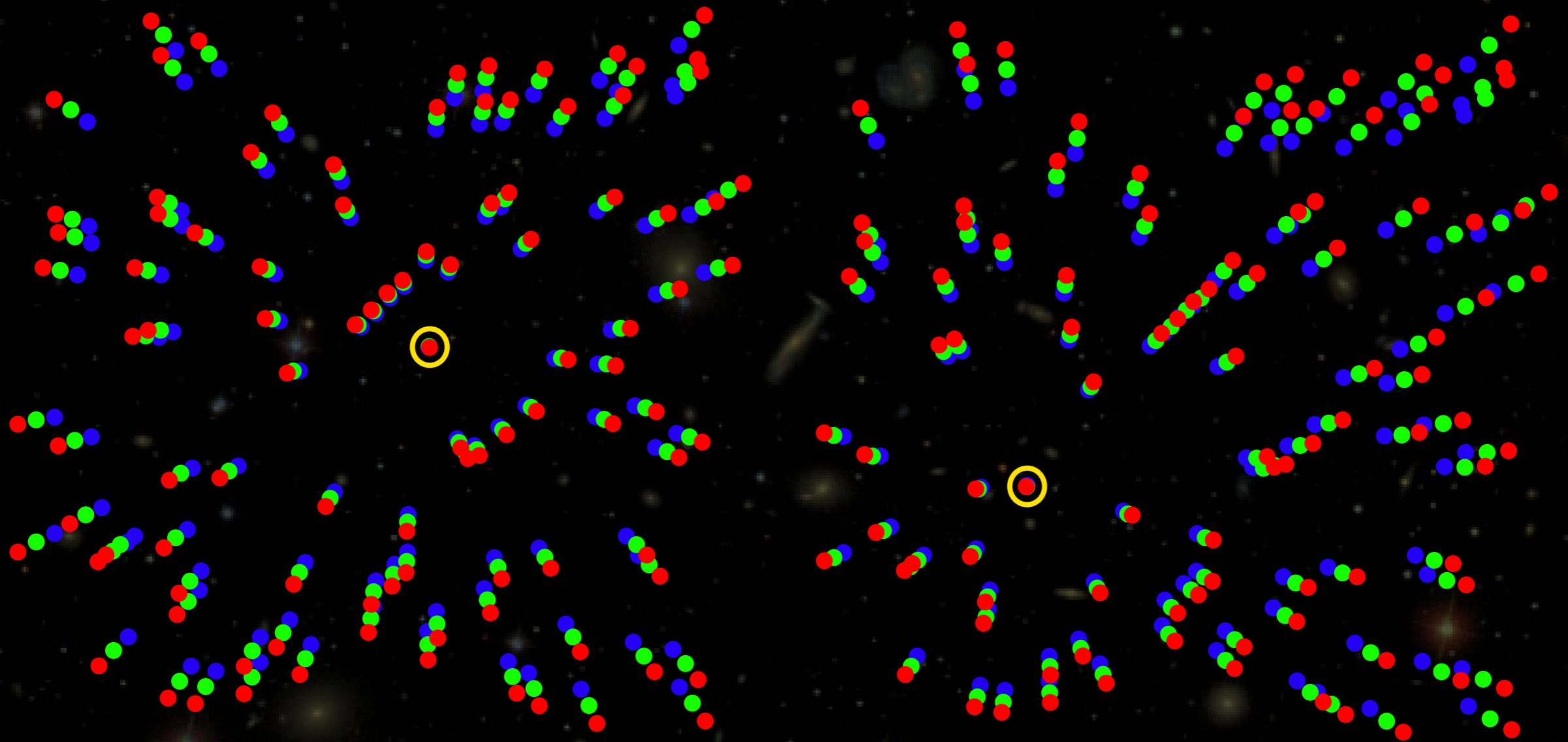
L'expansion est globale



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)

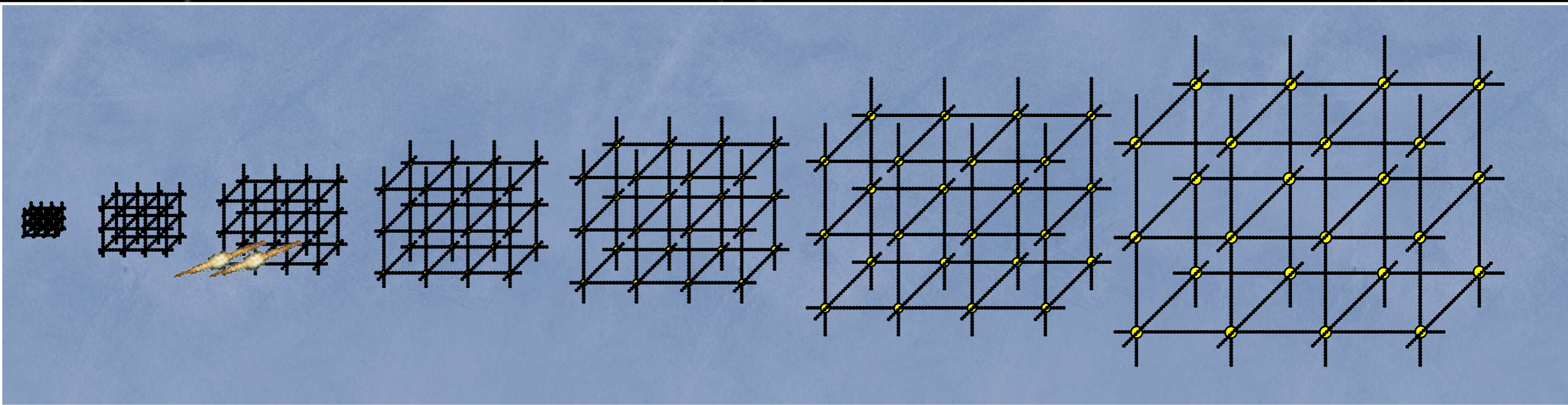


Figure: Benoît Revenu

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)

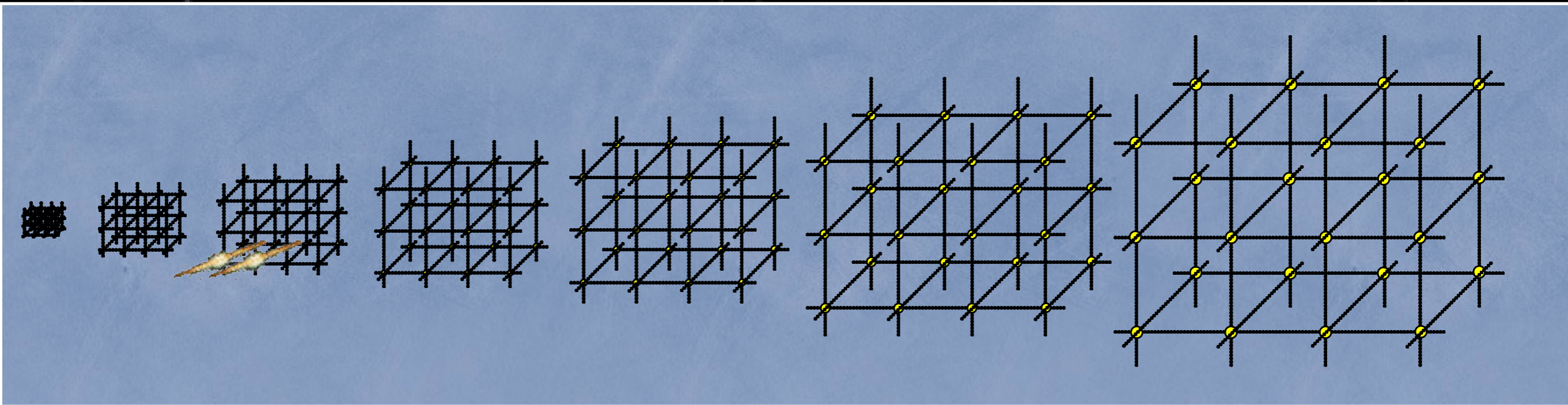


Figure: Benoît Revenu

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)

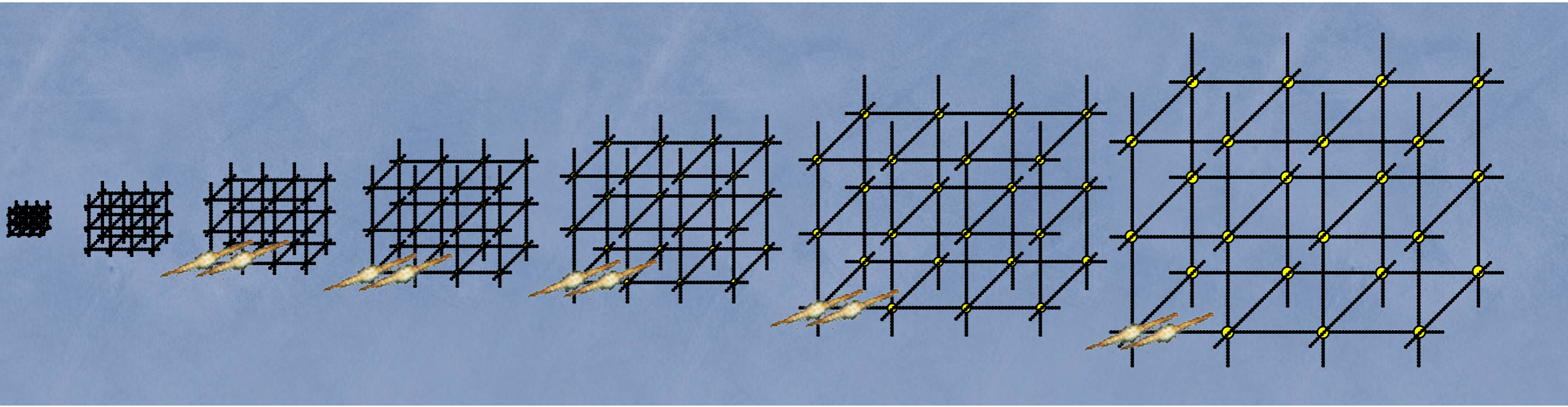


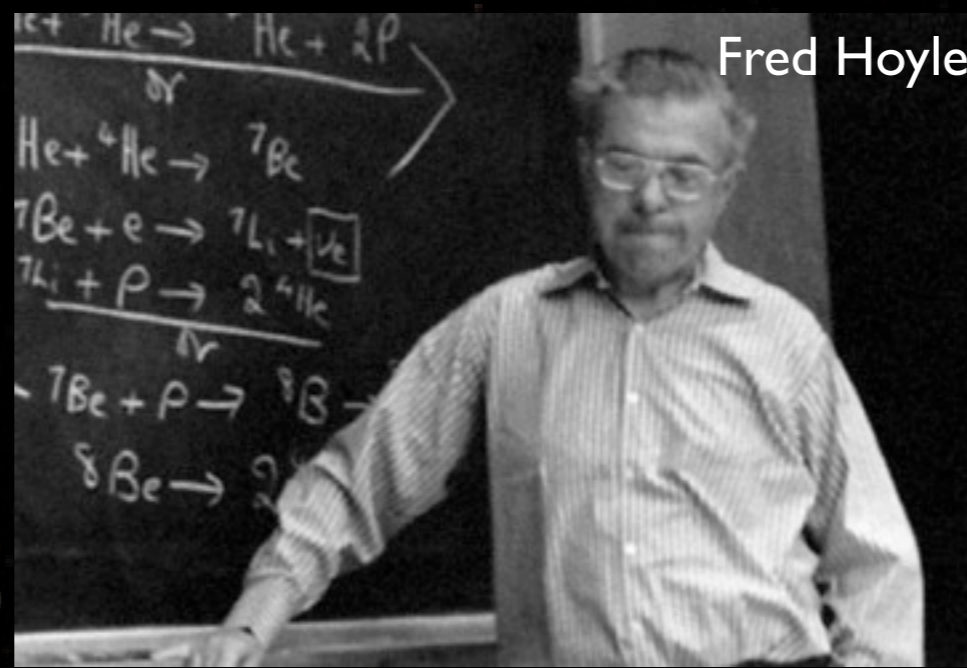
Figure: Benoît Revenu

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)



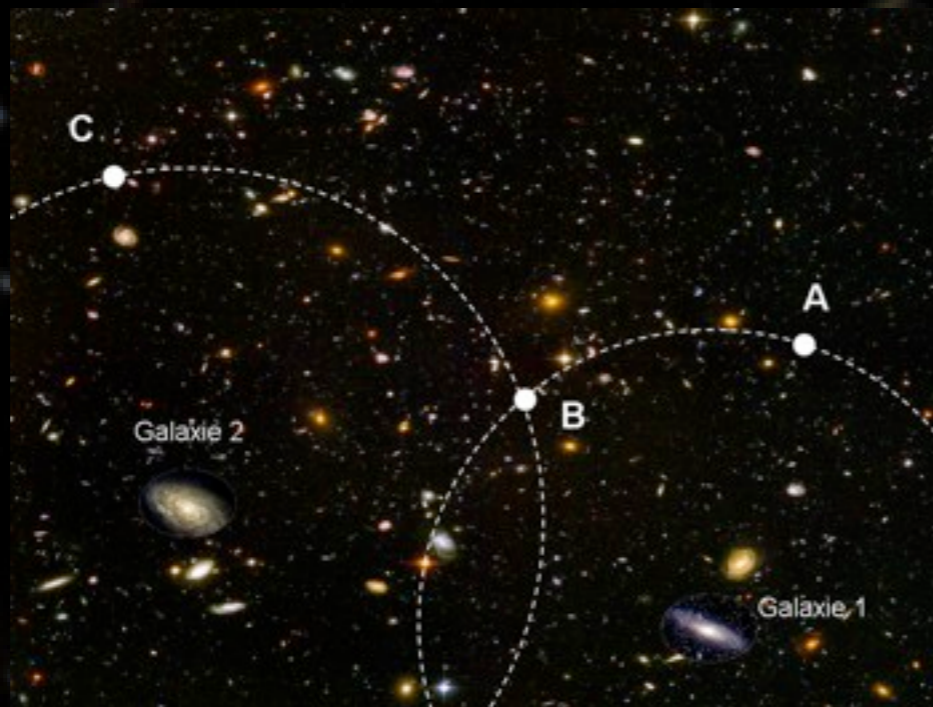
Big Bang ?

- **Georges Lemaître (1927)**
 - ★ Relativité Générale \Rightarrow Univers dynamique : expansion ou contraction
 - ★ À partir d'observations, il opte pour l'expansion
 - ★ Modèle de «l'atome primitif» :
 - Plus on remonte par le passé tout était plus dense (et donc plus chaud). L'univers est alors né d'un atome primitif qui s'est «désintégré» au cours de l'expansion
 - ★ Cette idée choque nombre de physiciens dont Fred Hoyle qui la qualifie de «Big Bang» de manière moqueuse.
 - ★ Elle ne séduit pas Einstein qui préfère un Univers statique
 - ★ Hubble règle la question en 1929, Gamow l'étudie en détails en 1940



Le principe cosmologique

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



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

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

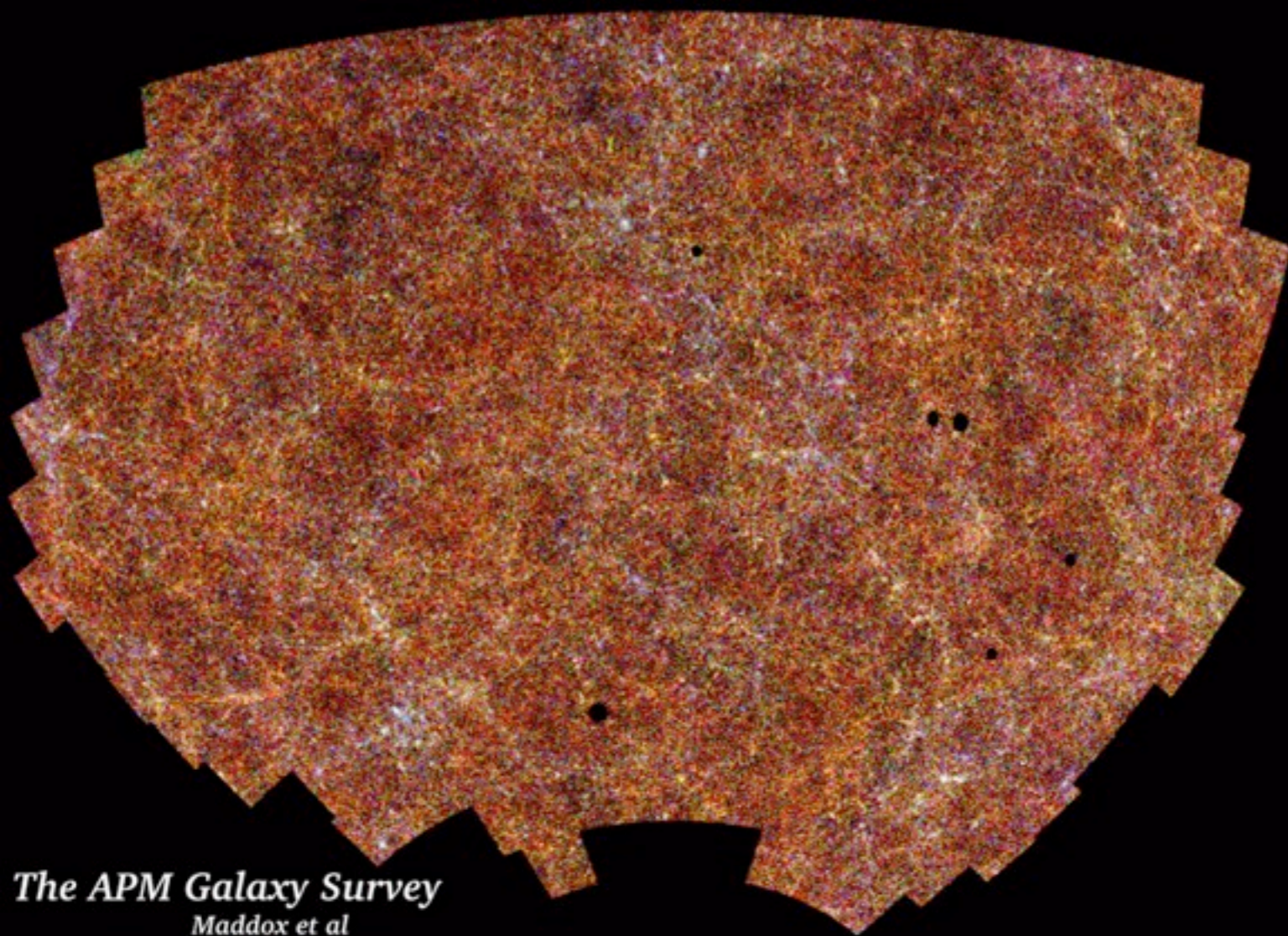
donc les propriétés
cosmologiques en A et en C sont
identiques = homogénéité

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

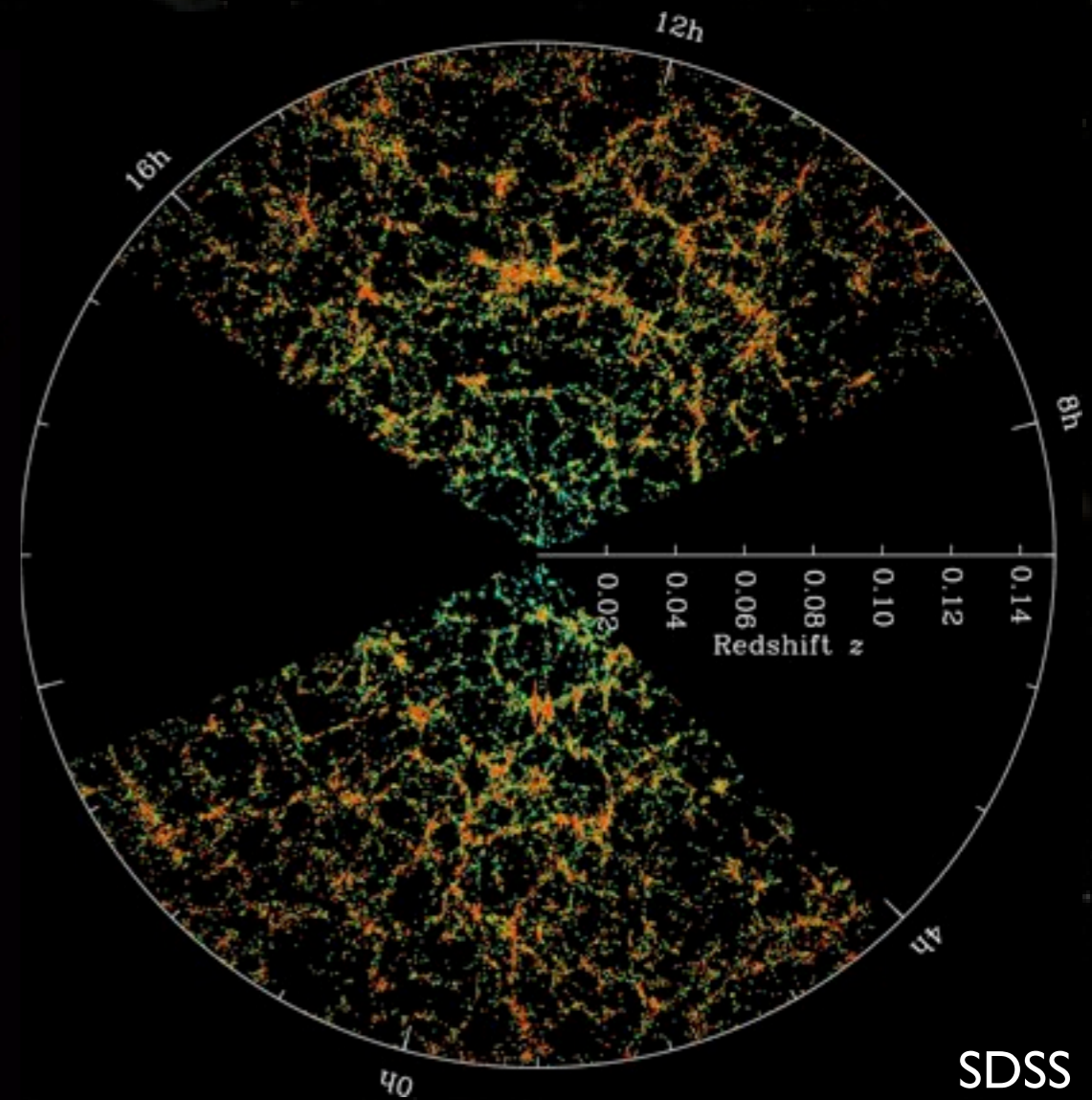


Le principe cosmologique :

«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



homogénéité : le CMB (cf. plus tard)

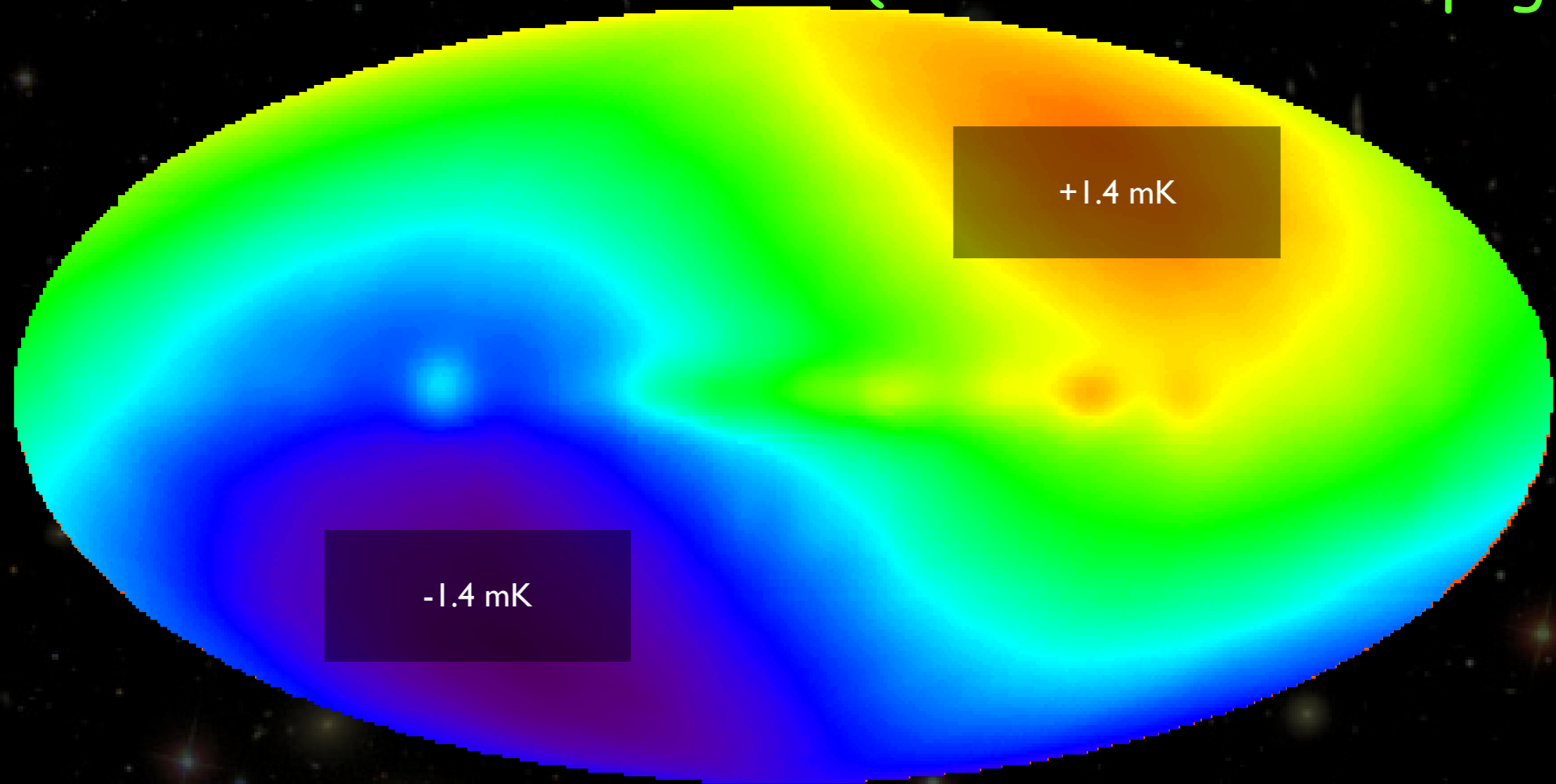
(COBE/DMR homepage)

corps noir à 3 K



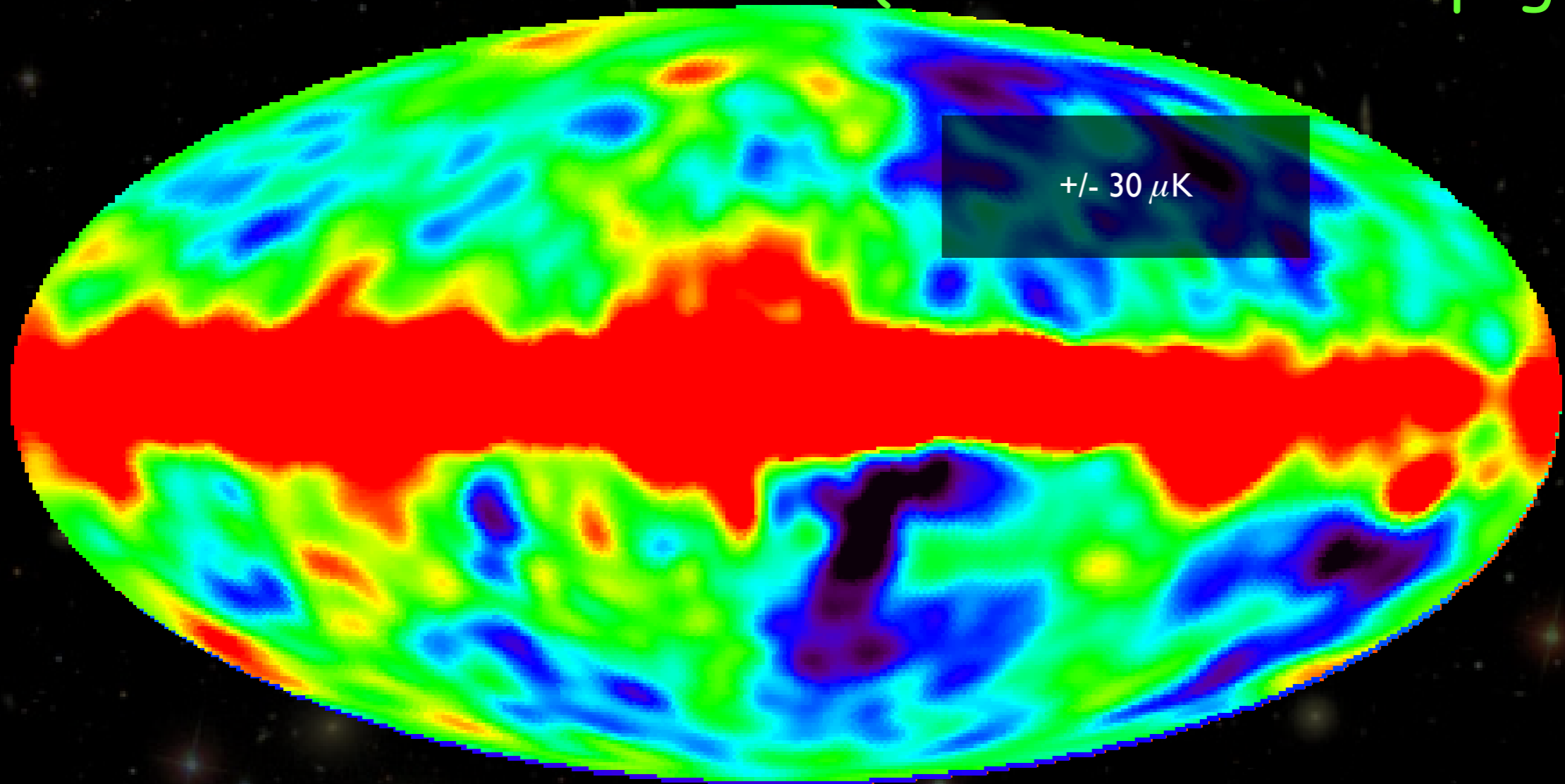
homogénéité : le CMB (cf. plus tard)

(COBE/DMR homepage)



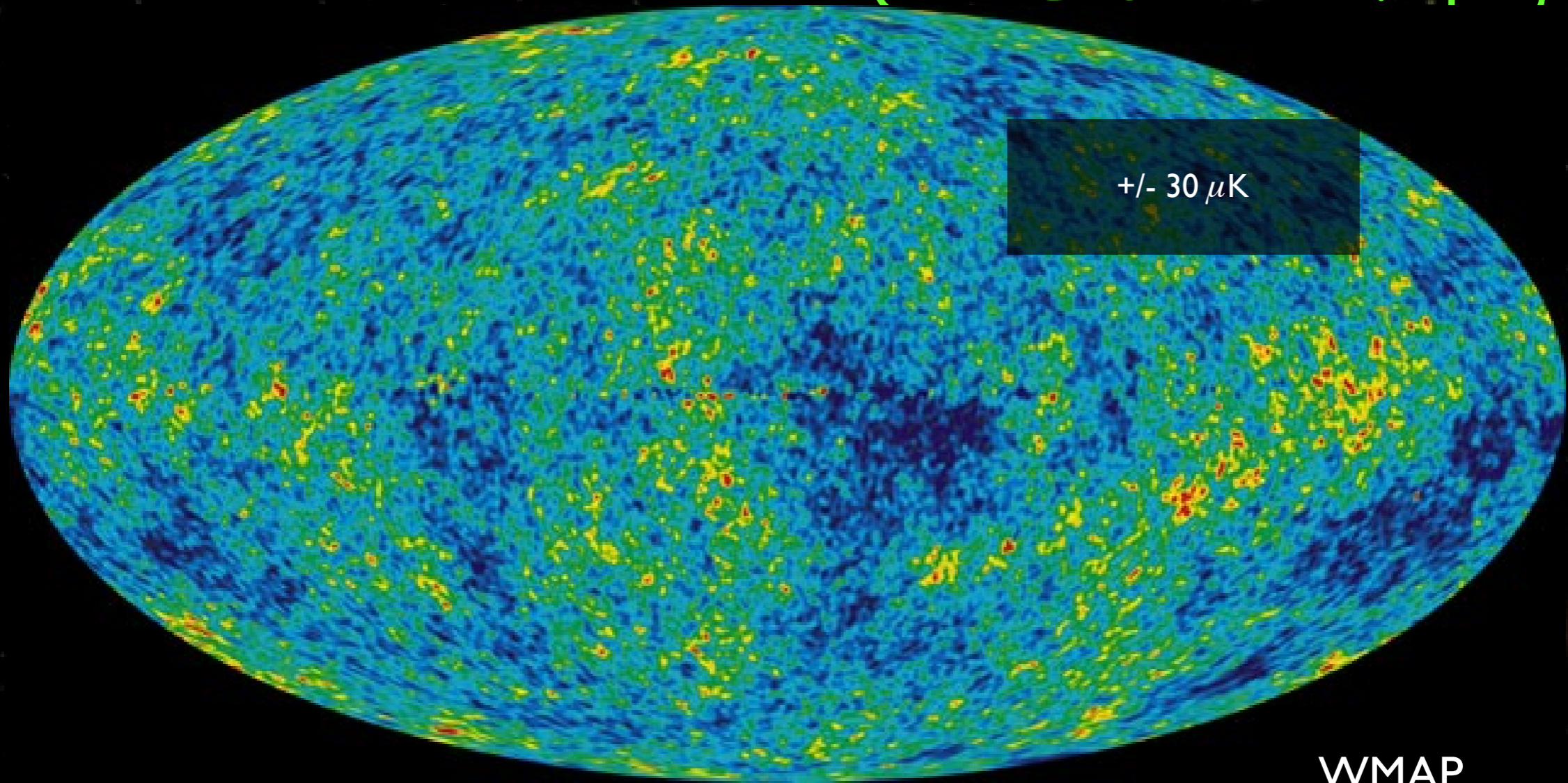
homogénéité : le CMB (cf. plus tard)

(COBE/DMR homepage)



homogénéité : le CMB (cf. plus tard)

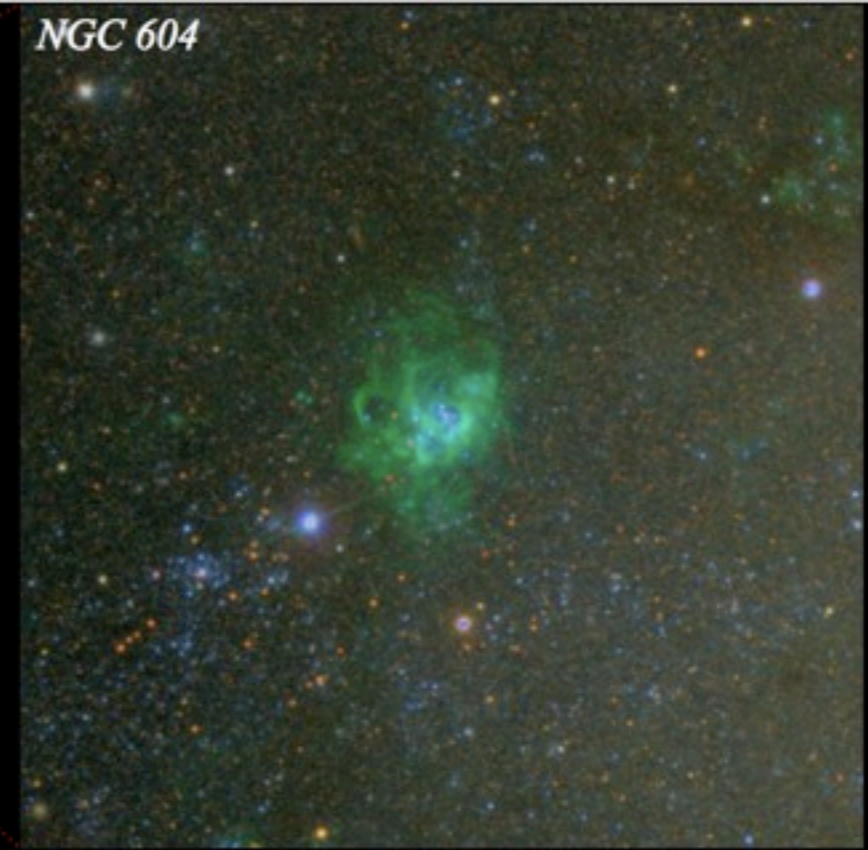
(COBE/DMR homepage)



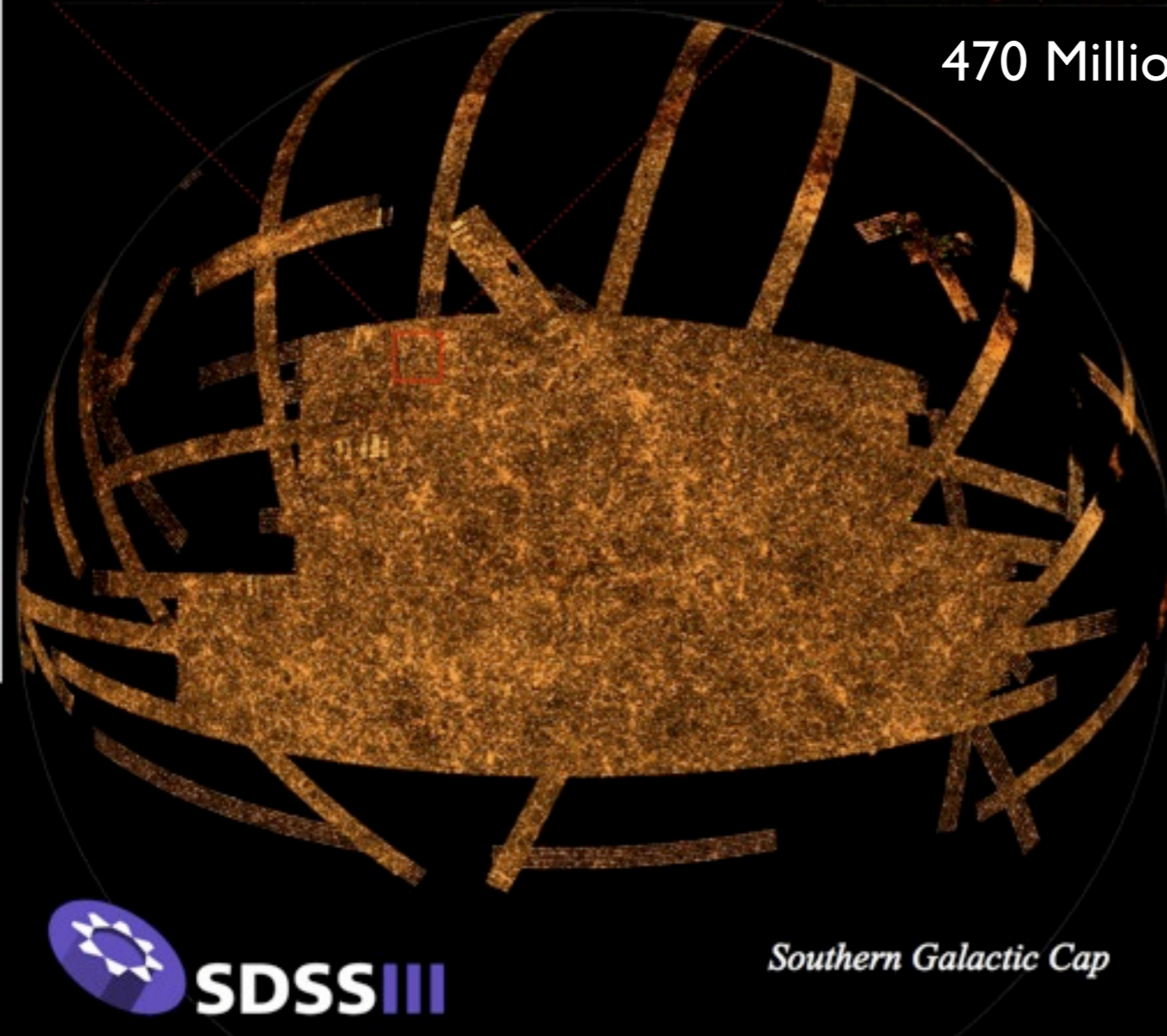
Janvier 2011

Messier 33

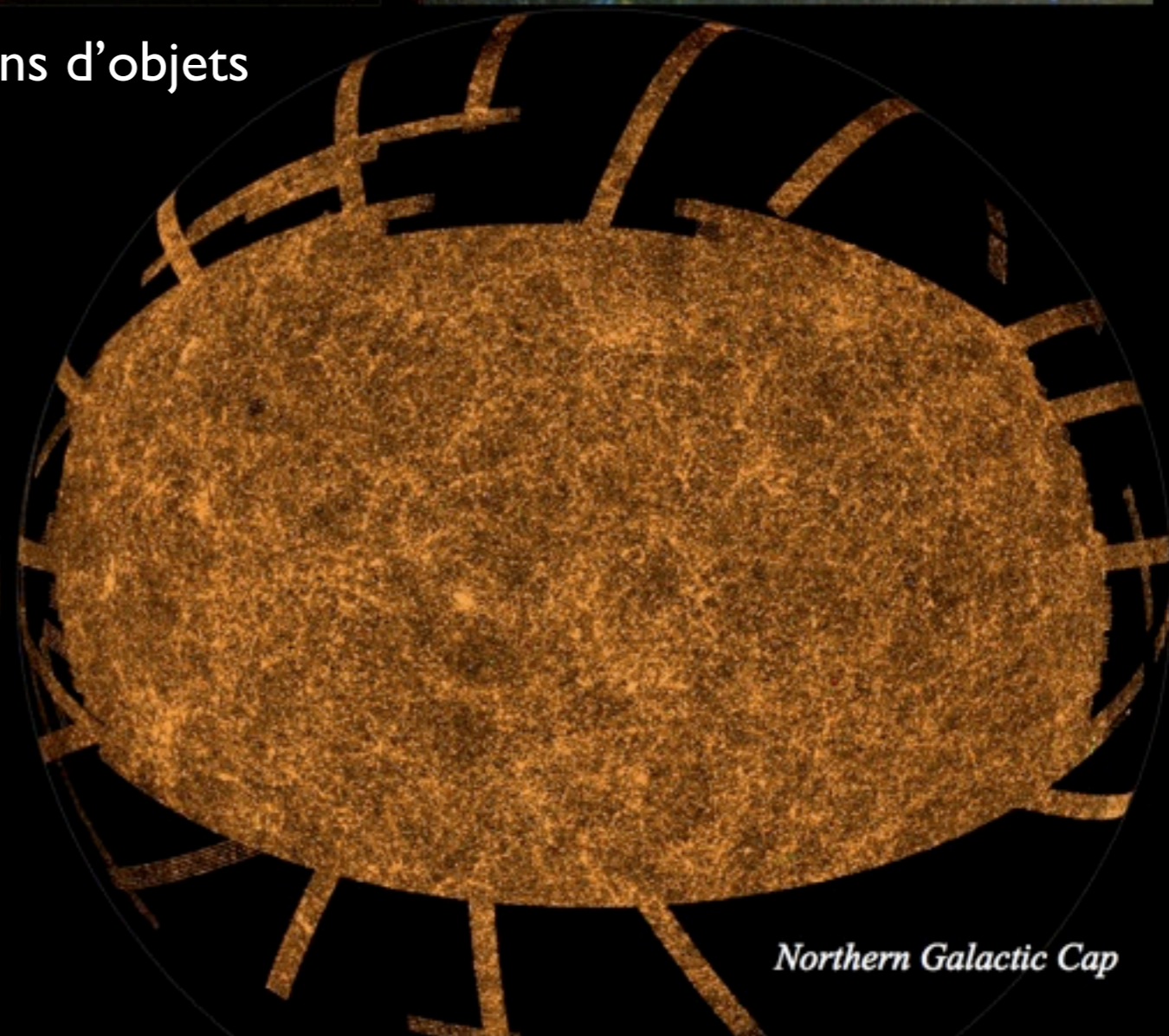
NGC 604



470 Millions d'objets



Southern Galactic Cap



Northern Galactic Cap