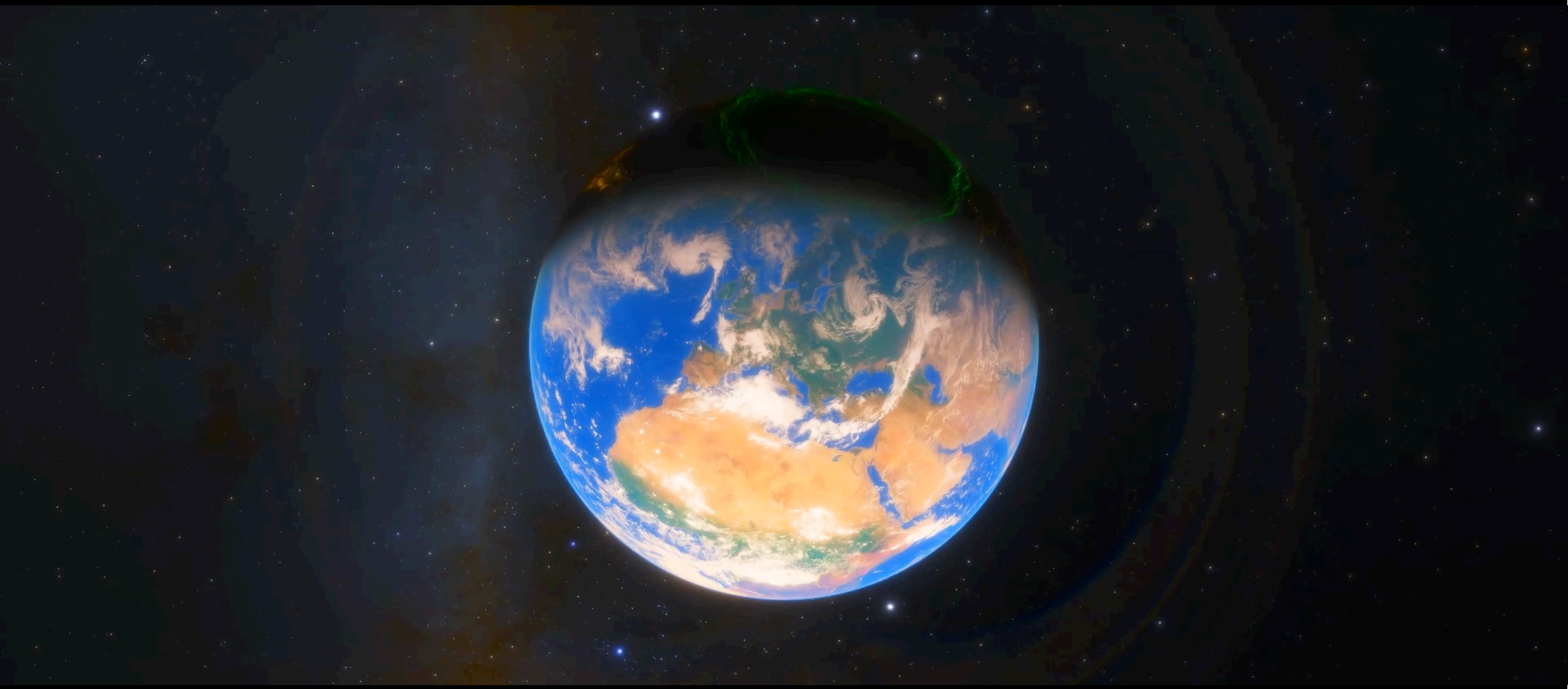
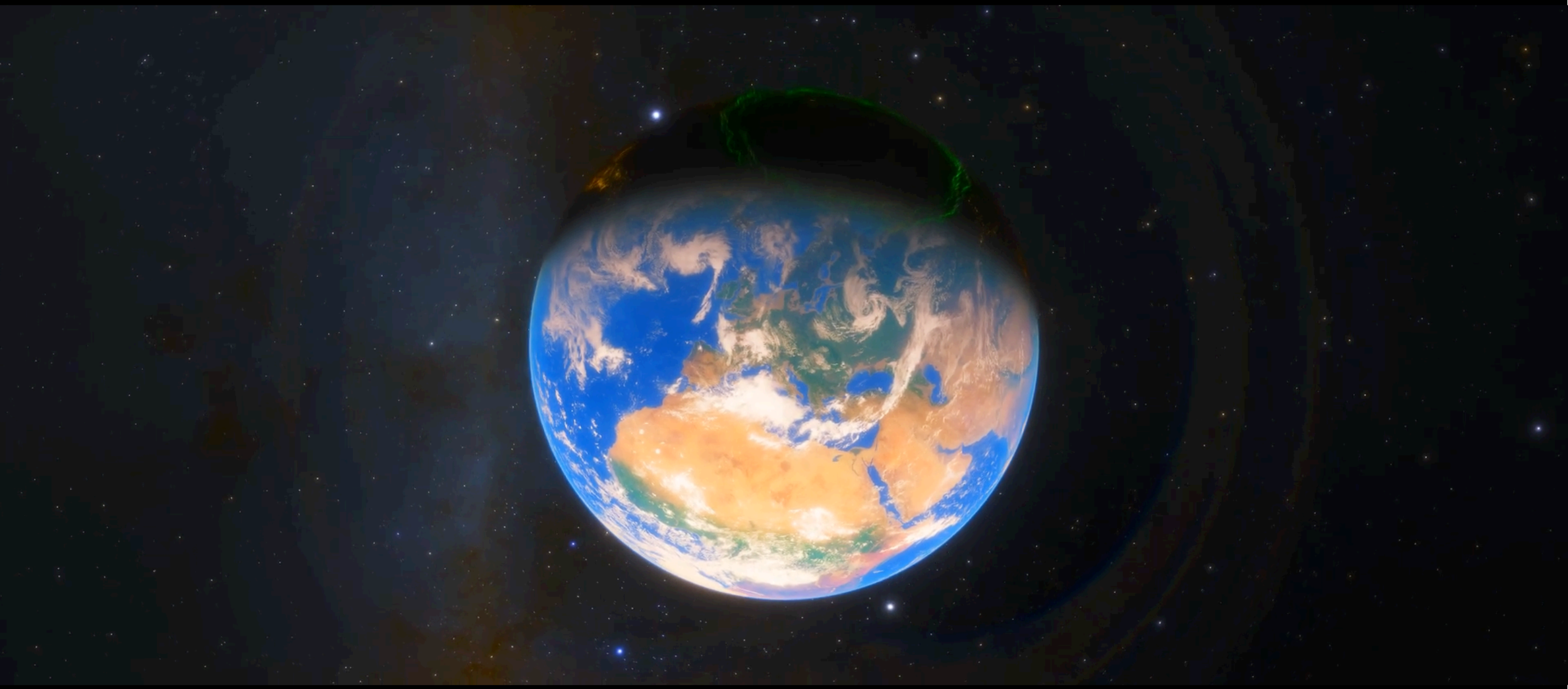
L'infiniment grand
et ses mystères

Julián Bautista
Chaire d'Excellence à Aix-Marseille Université

C'est parti !



C'est parti !



La plus grande carte 3D de l'Univers

faite par le projet Sloan Digital Sky Survey

https://www.youtube.com/watch?v=KJJXbcf8kxA

Plus de 2 million de spectres observées !

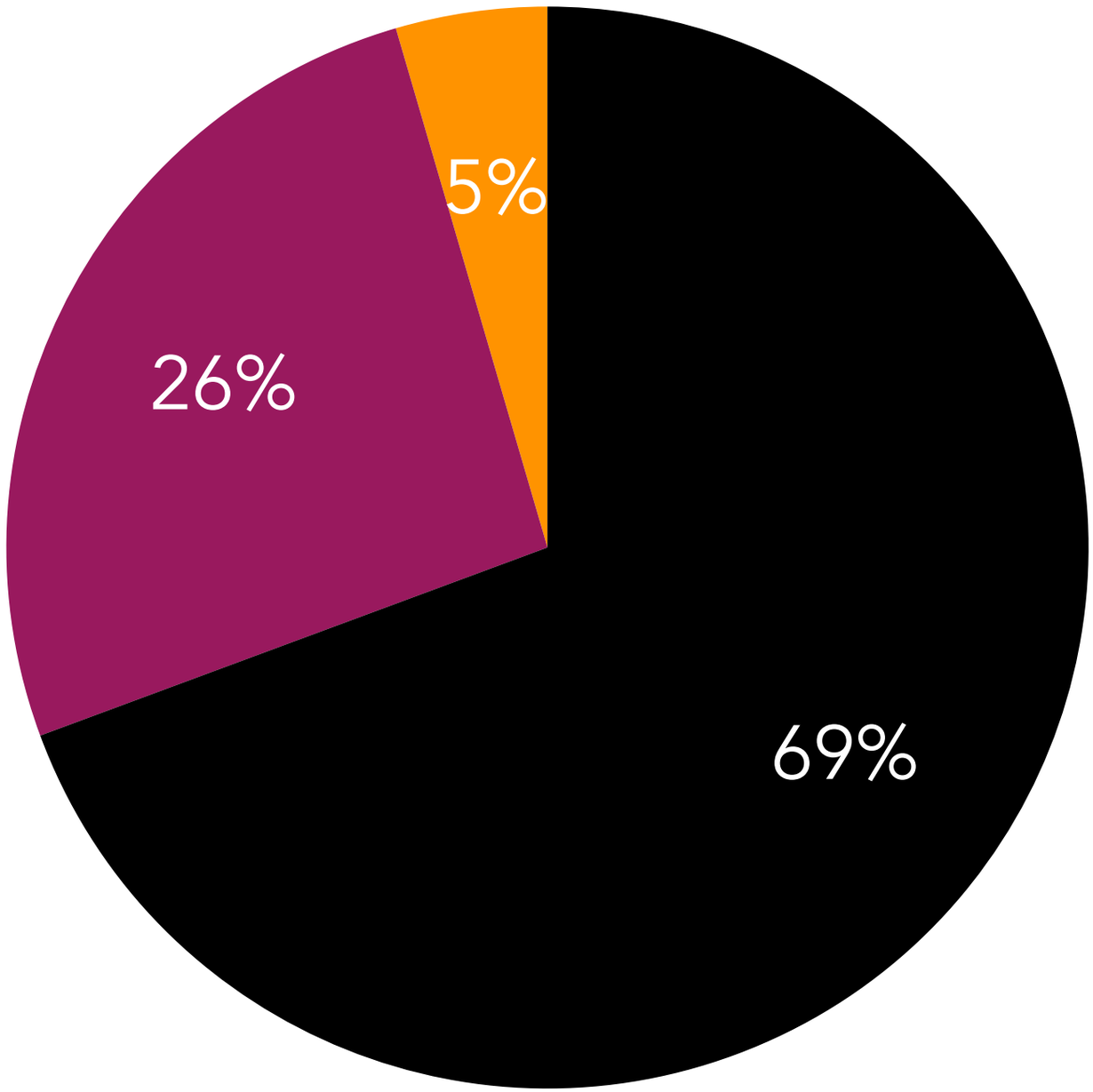
La plus grande carte 3D de l'Univers

faite par le projet Sloan Digital Sky Survey

https://www.youtube.com/watch?v=KJJXbcf8kxA

Plus de 2 million de spectres observées !

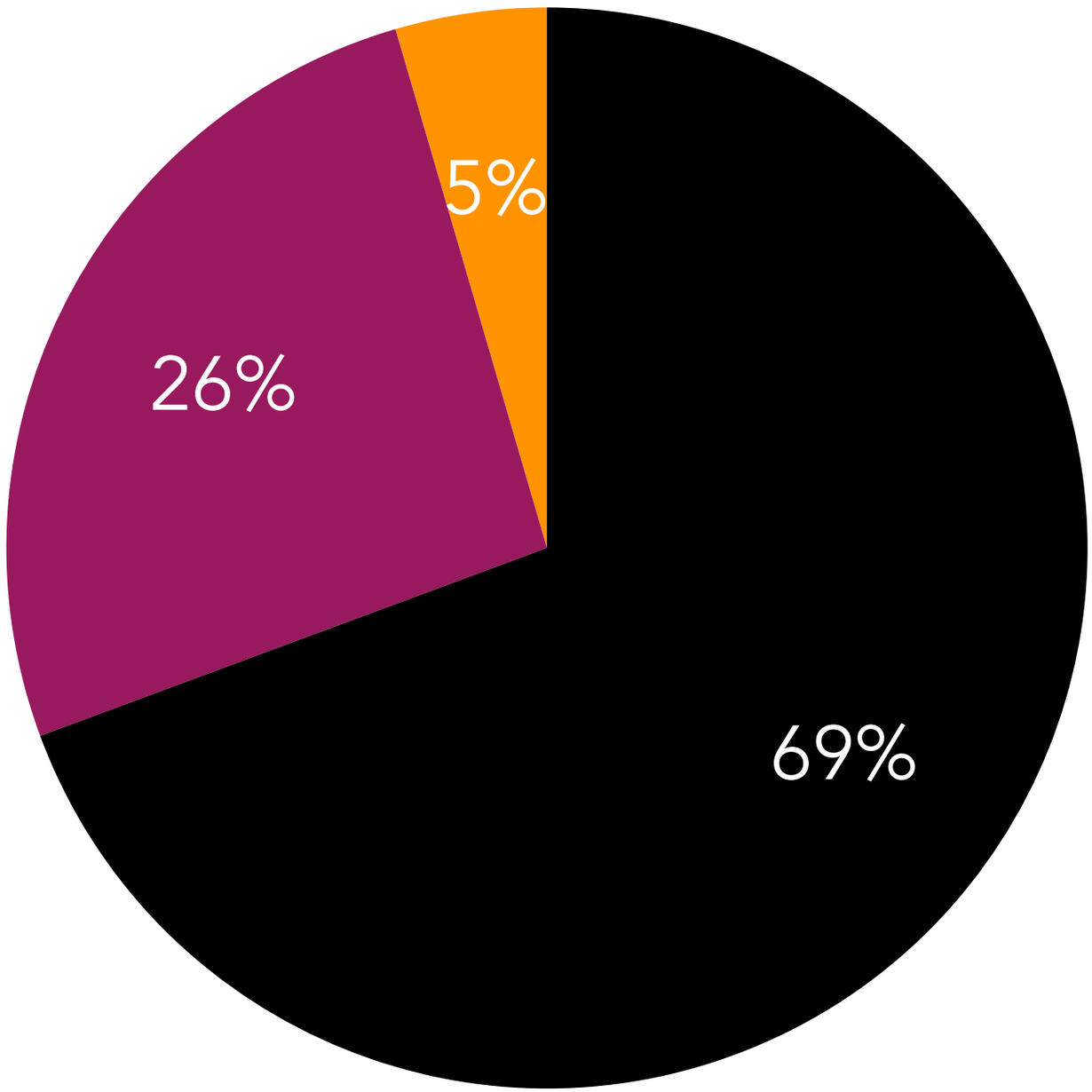
La mystérieuse composition de l'Univers



La mystérieuse composition de l'Univers

Matière "normale" ou visible

Nous, les planètes, les étoiles, les galaxies



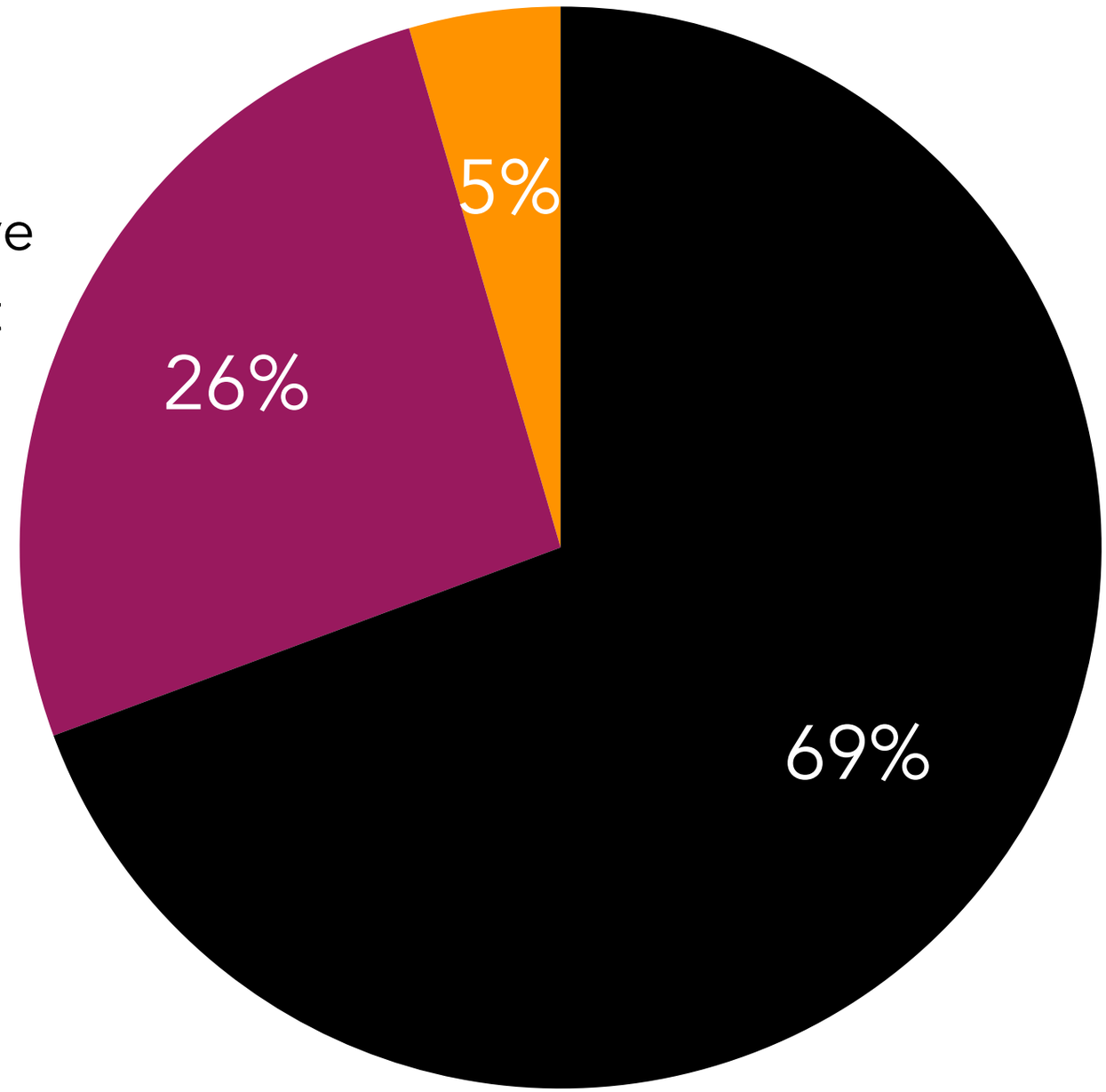
La mystérieuse composition de l'Univers

Matière "normale" ou visible

Nous, les planètes, les étoiles, les galaxies

Matière noire

Invisible mais attractive gravitationnellement



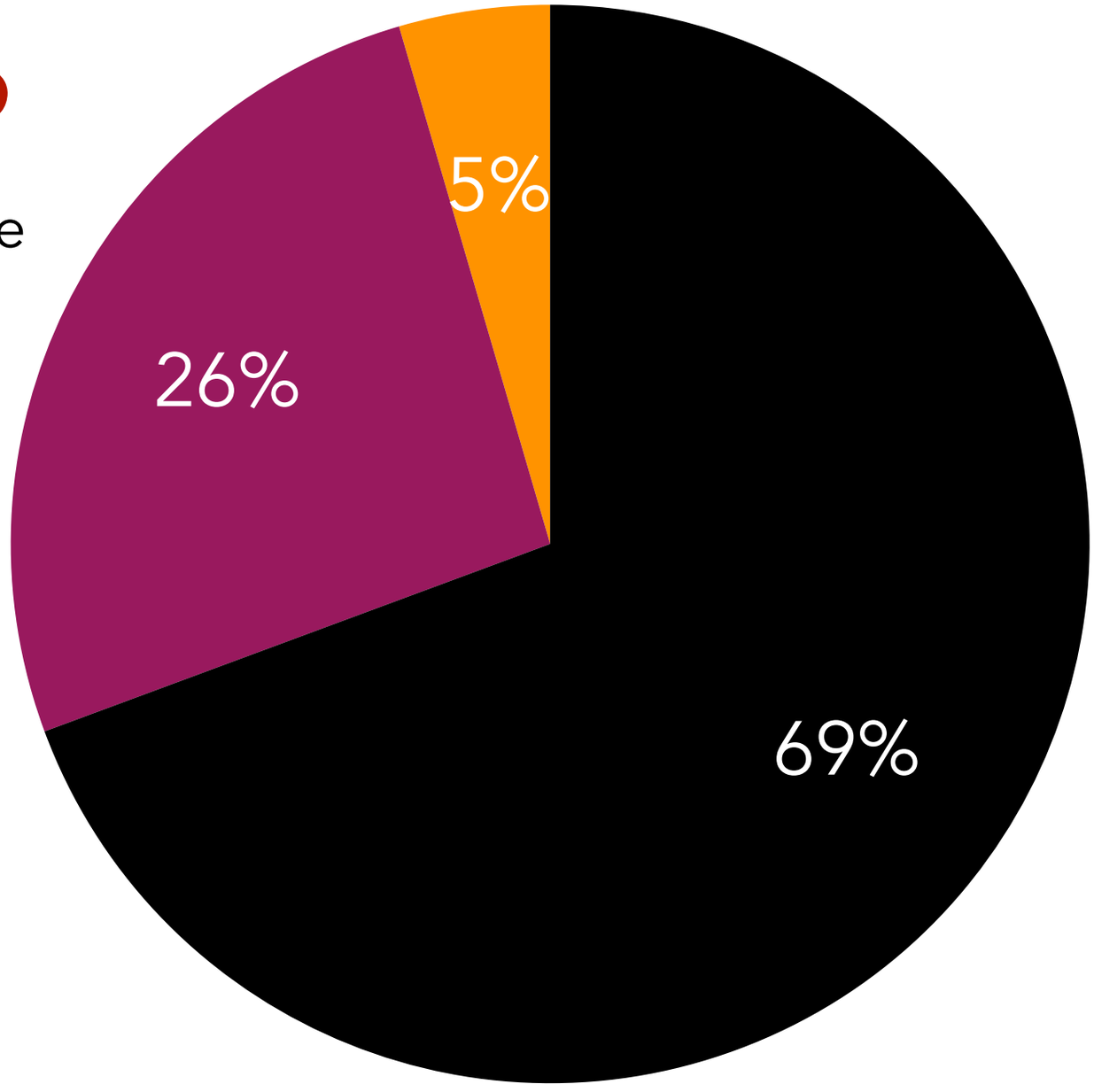
La mystérieuse composition de l'Univers

Matière "normale" ou visible

Nous, les planètes, les étoiles, les galaxies

Matière noire

Invisible mais attractive gravitationnellement



La mystérieuse composition de l'Univers

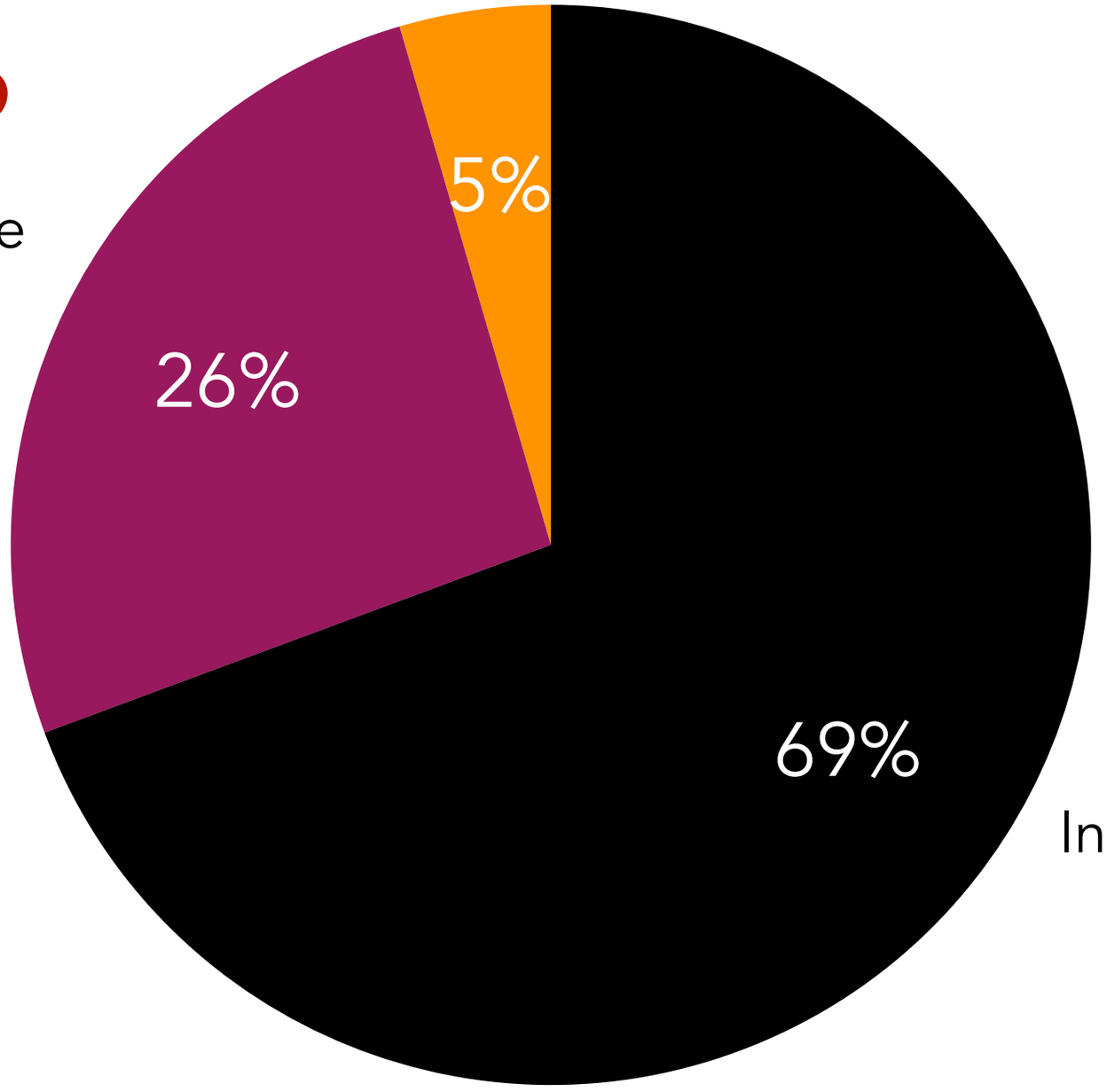
Matière "normale" ou visible

Nous, les planètes, les étoiles, les galaxies

? Matière noire ?

Invisible mais attractive gravitationnellement

? ?



Énergie noire

Invisible et repulsive !

Anti-gravité ?!

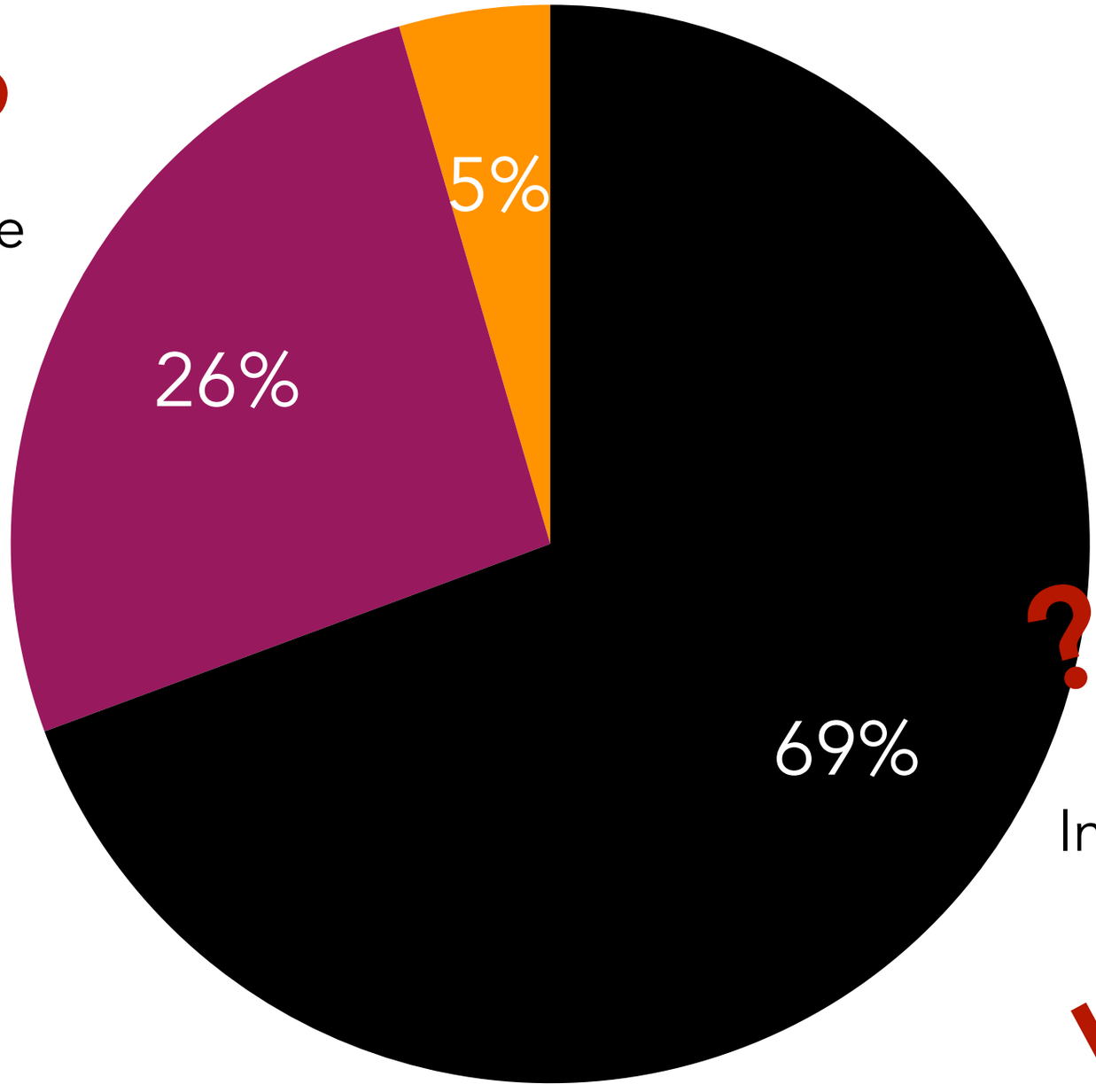
La mystérieuse composition de l'Univers

Matière "normale" ou visible

Nous, les planètes, les étoiles, les galaxies

Matière noire

Invisible mais attractive gravitationnellement



Énergie noire

Invisible et repulsive !

Anti-gravité ?!

La mystérieuse histoire de l'Univers

La mystérieuse histoire de l'Univers

La mystérieuse histoire de l'Univers

La mystérieuse histoire de l'Univers

La mystérieuse histoire de l'Univers

Big Bang?

Plasma primordial

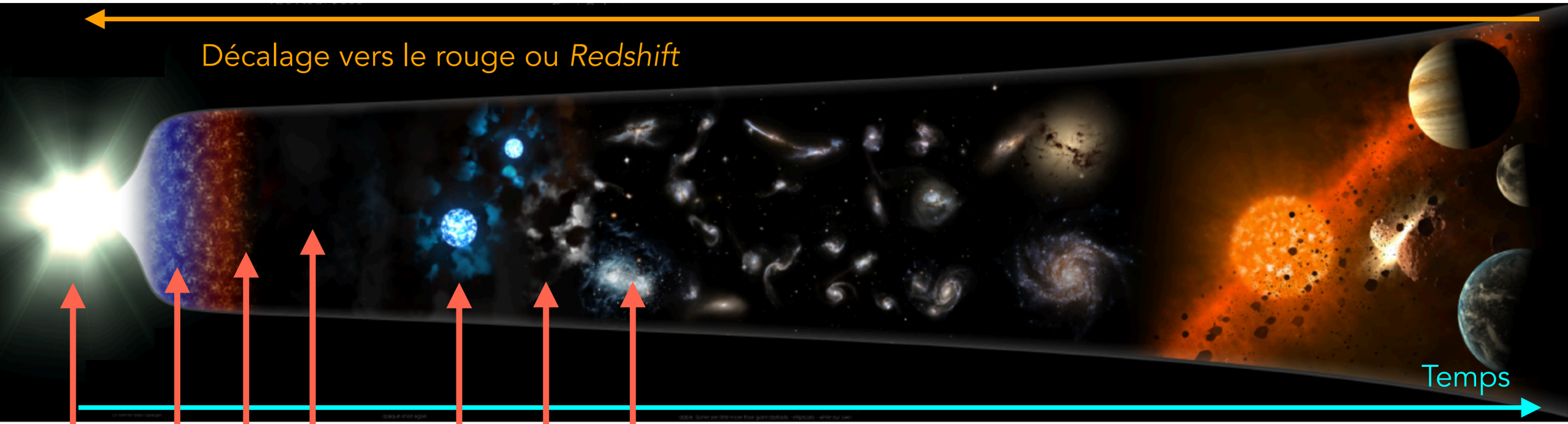
Fond diffus cosmologique

L'ère sombre (sans étoiles)

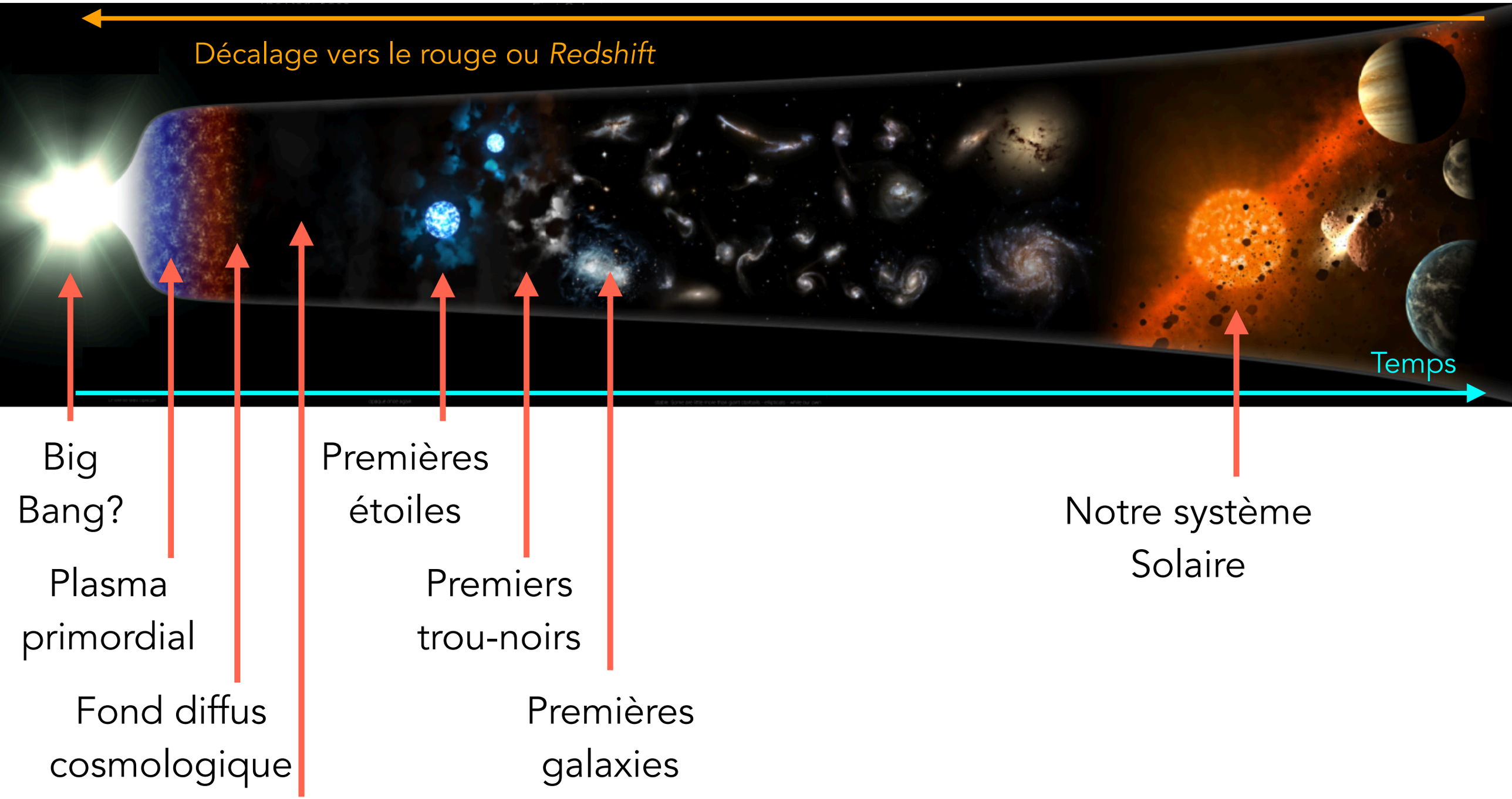
La mystérieuse histoire de l'Univers

La mystérieuse histoire de l'Univers

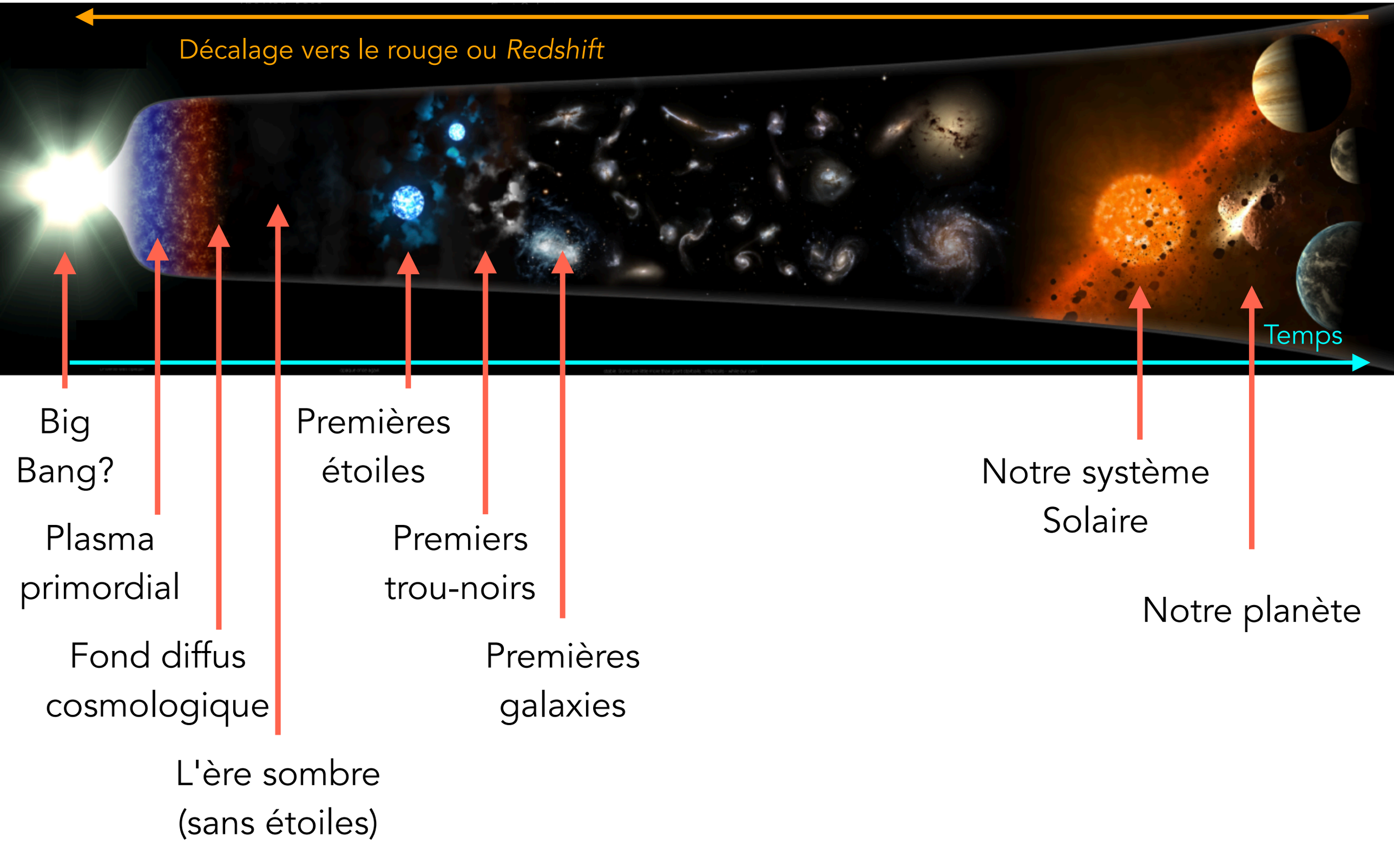
La mystérieuse histoire de l'Univers



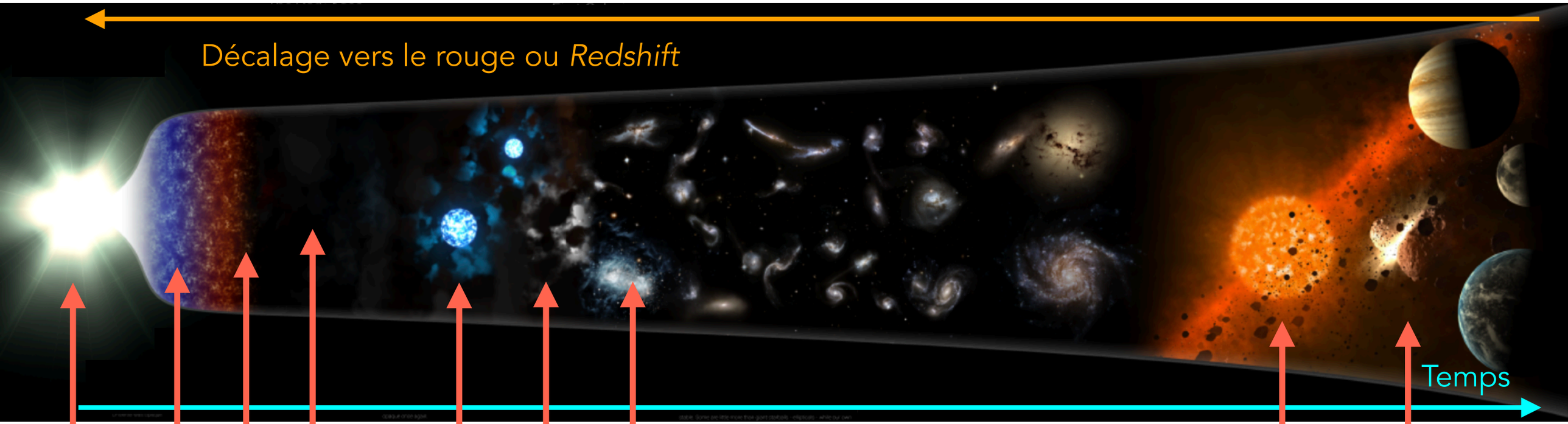
La mystérieuse histoire de l'Univers



La mystérieuse histoire de l'Univers



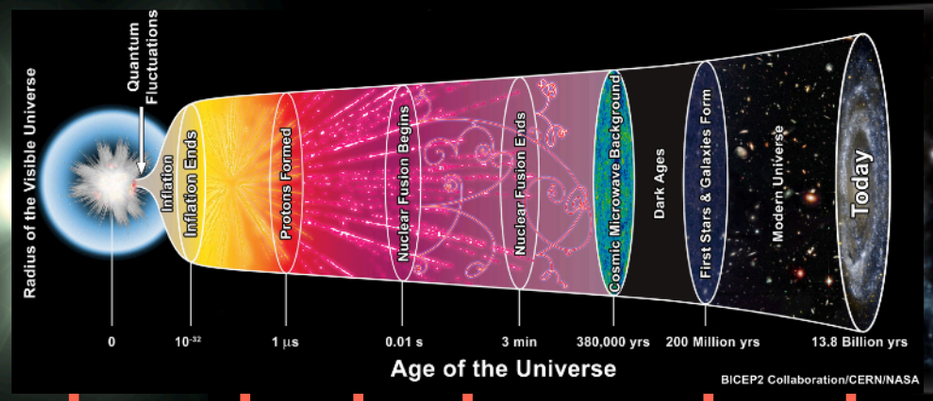
La mystérieuse histoire de l'Univers



13,8 milliards d'années d'histoire !

La mystérieuse histoire de l'Univers

Décalage vers le rouge ou *Redshift*



Temps

Big Bang?

Plasma primordial

Fond diffus cosmologique

L'ère sombre (sans étoiles)

Premières étoiles

Premiers trou-noirs

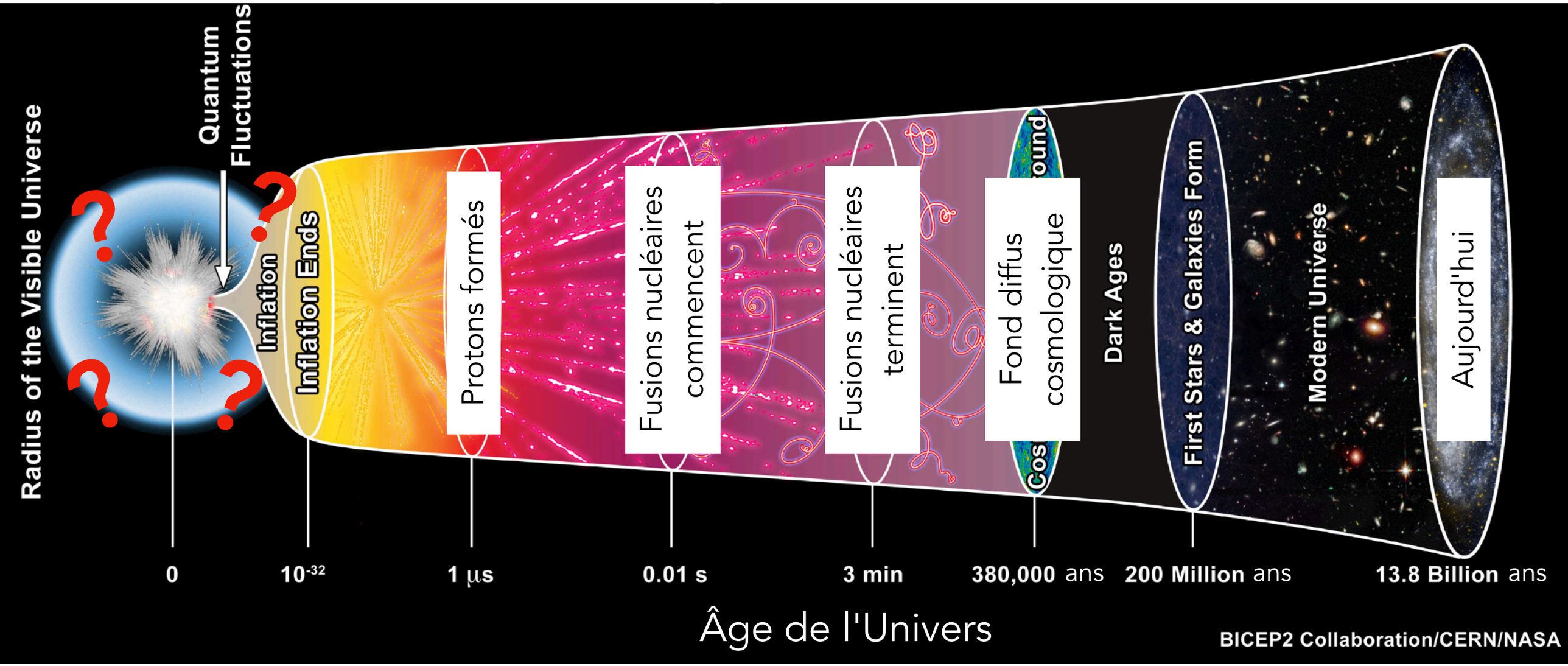
Premières galaxies

Notre système Solaire

Notre planète

13,8 milliards d'années d'histoire !

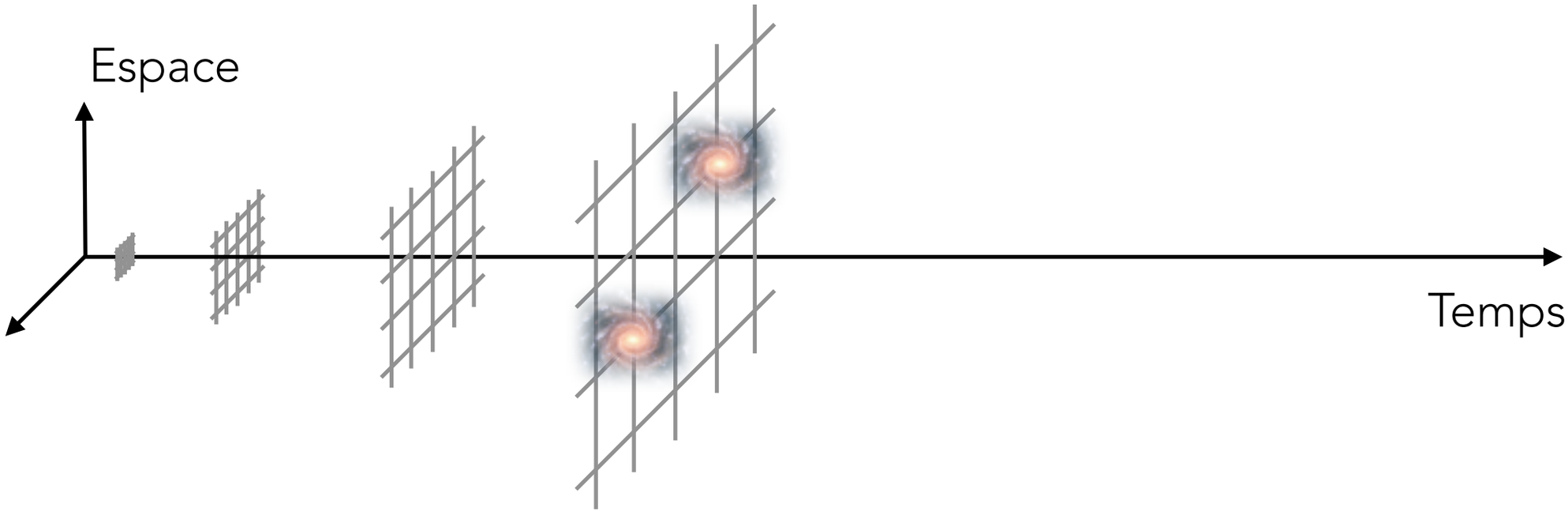
Les premières minutes de l'Univers



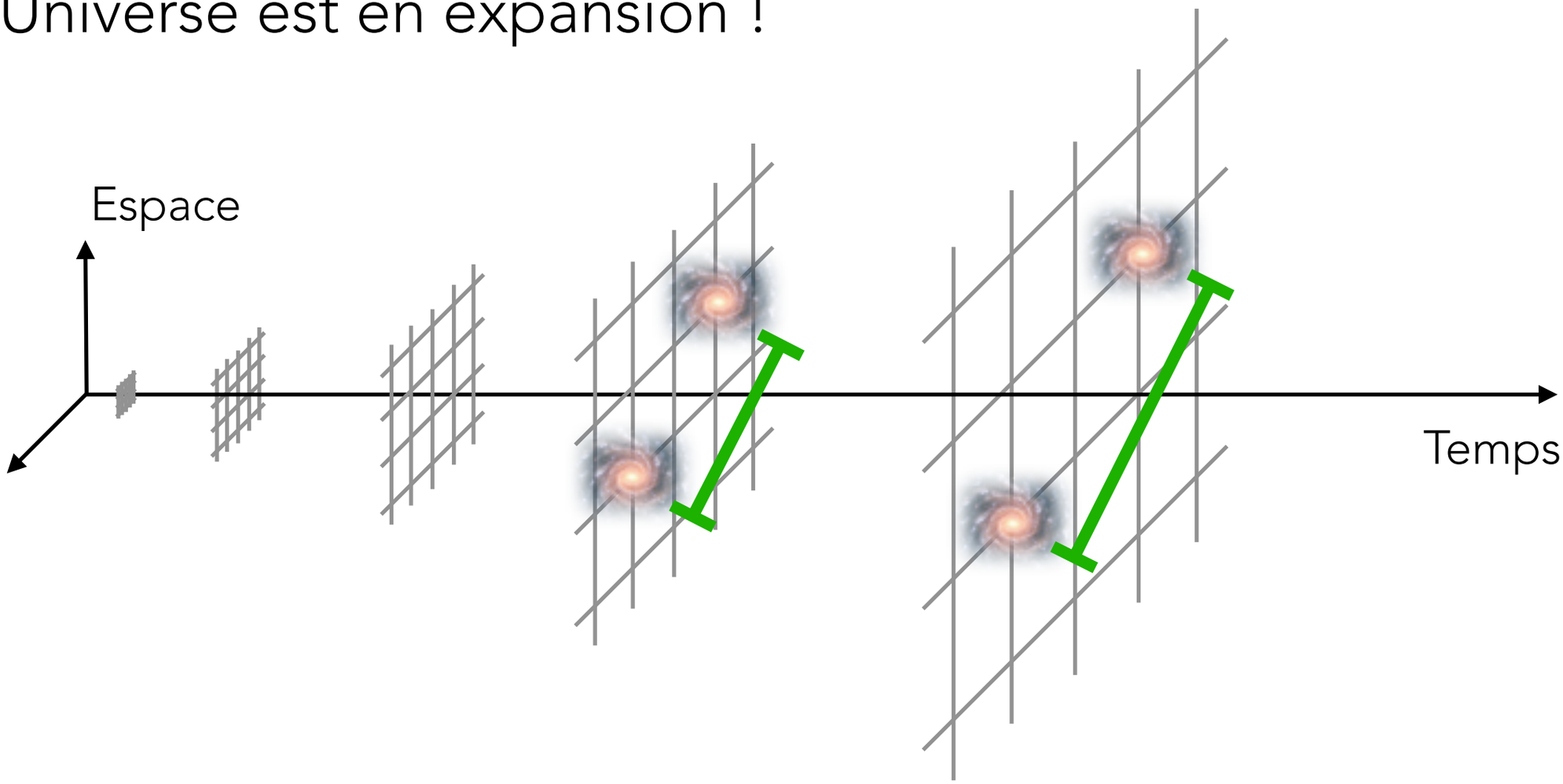
L'histoire de l'Univers ⟷ Physique des particules
Physique nucléaire

L'expansion de l'Univers et l'énergie noire

L'Universe est en expansion !

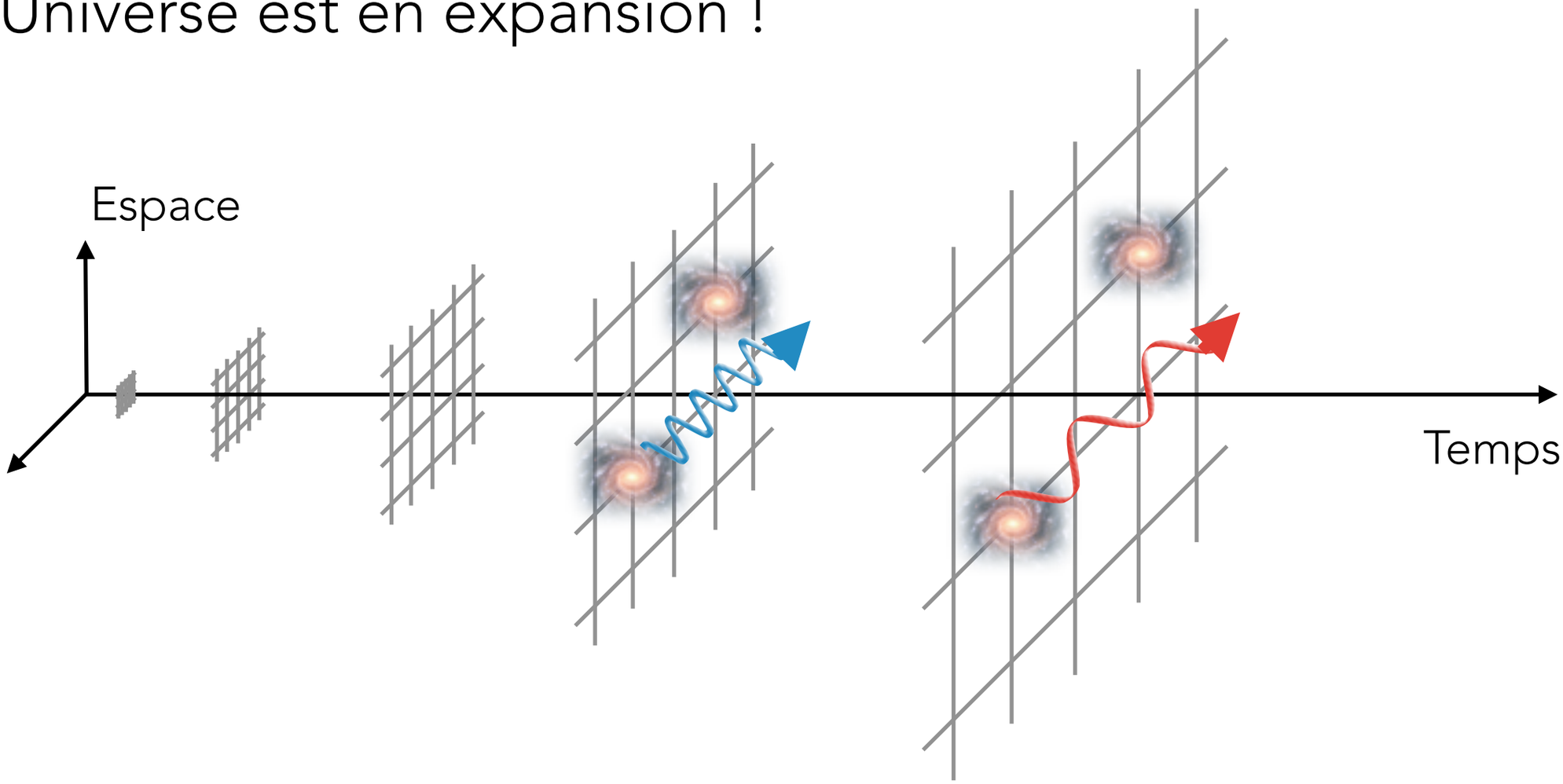


L'Universe est en expansion !



1 : plus d'espace vide entre galaxies, les **distances** augmentent

L'Universe est en expansion !



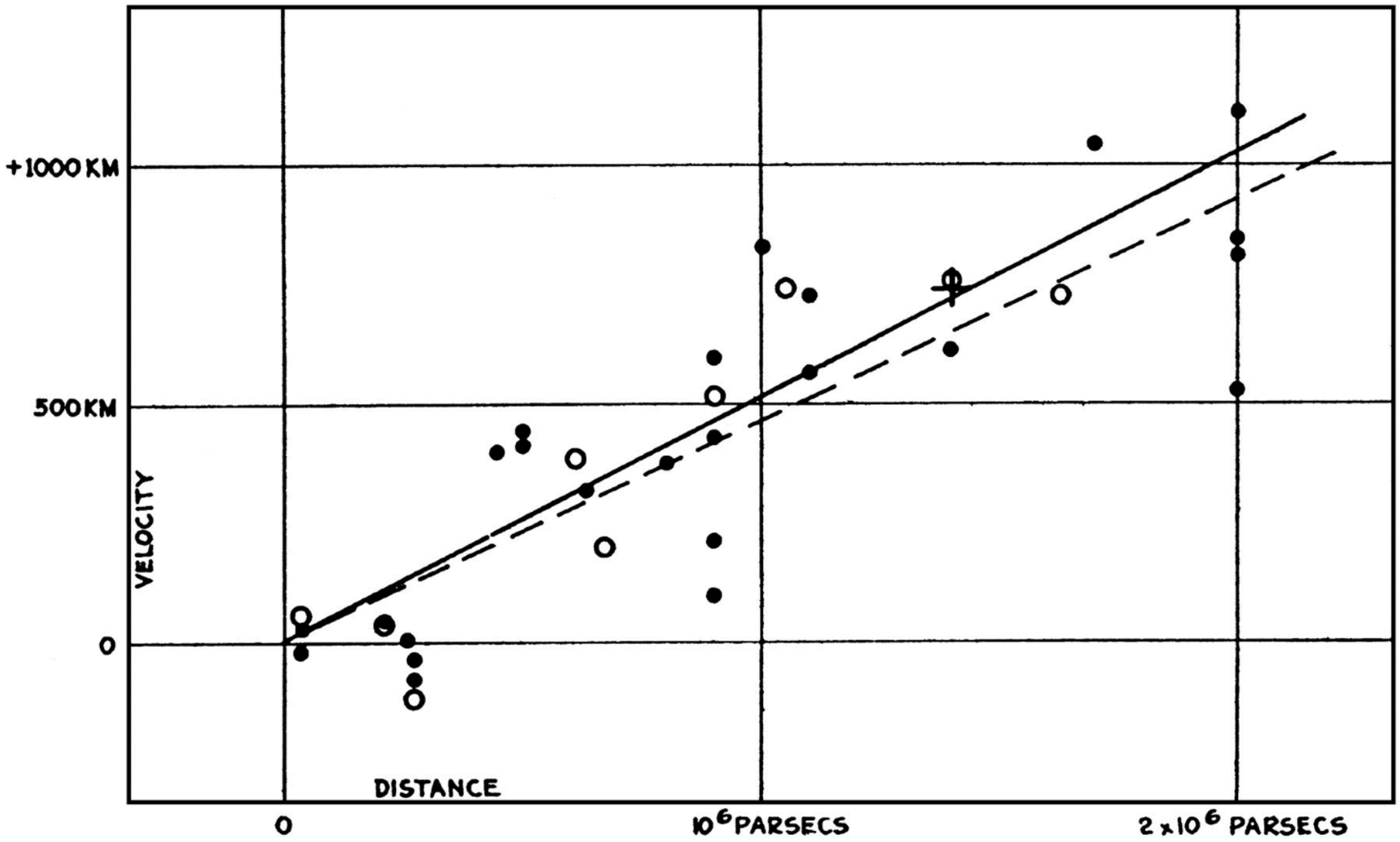
1 : plus d'espace vide entre galaxies, les **distances** augmentent

2 : la lumière est étirée et décalée vers le rouge (**redshift**)

La découverte de l'expansion par Hubble en 1930

redshift

Vitesses des galaxies en km/s



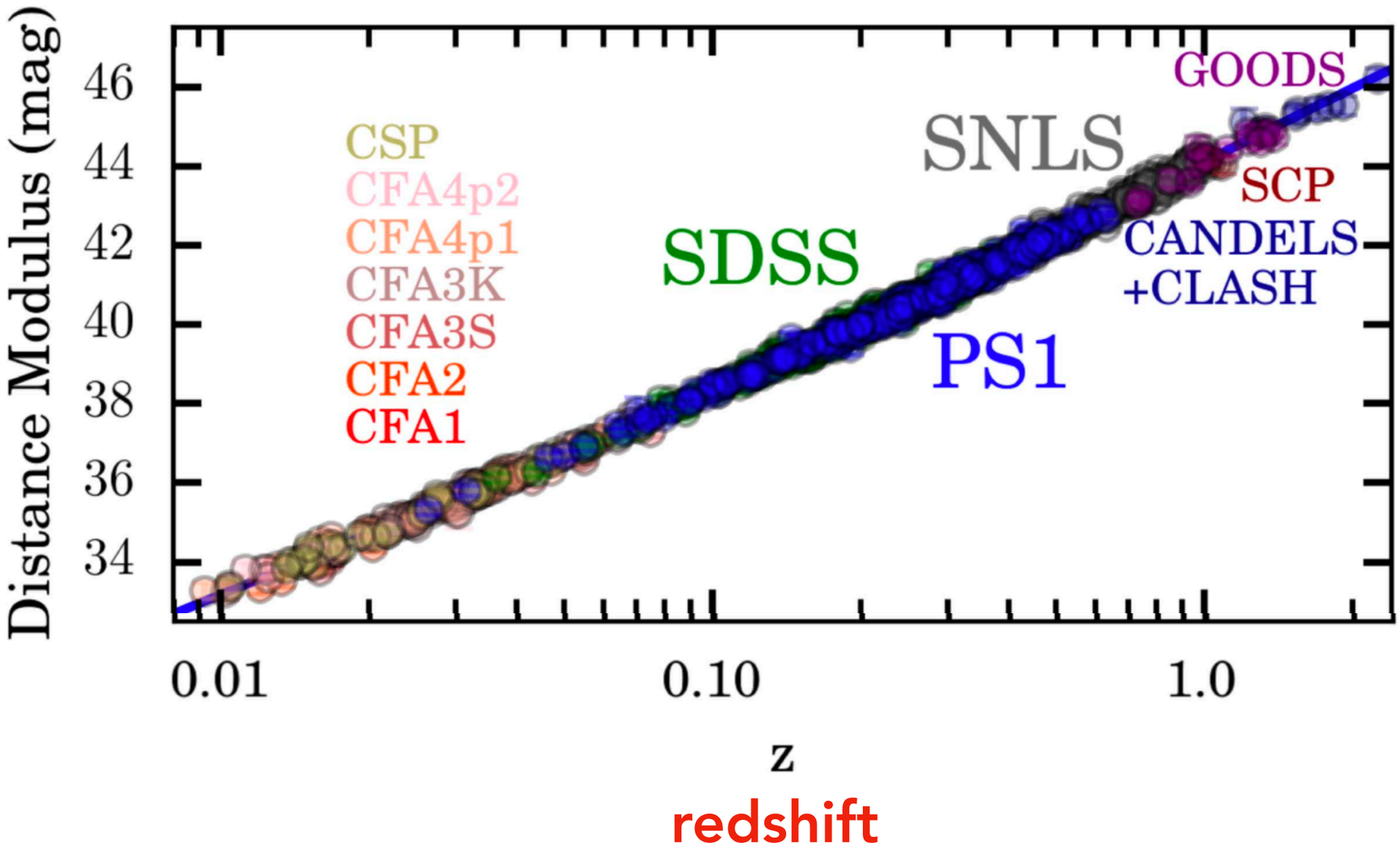
distances

en millions d'années-lumière

Pente de la courbe est la constante d'Hubble : H_0

Dernière version du diagramme d'Hubble de 2018

distances

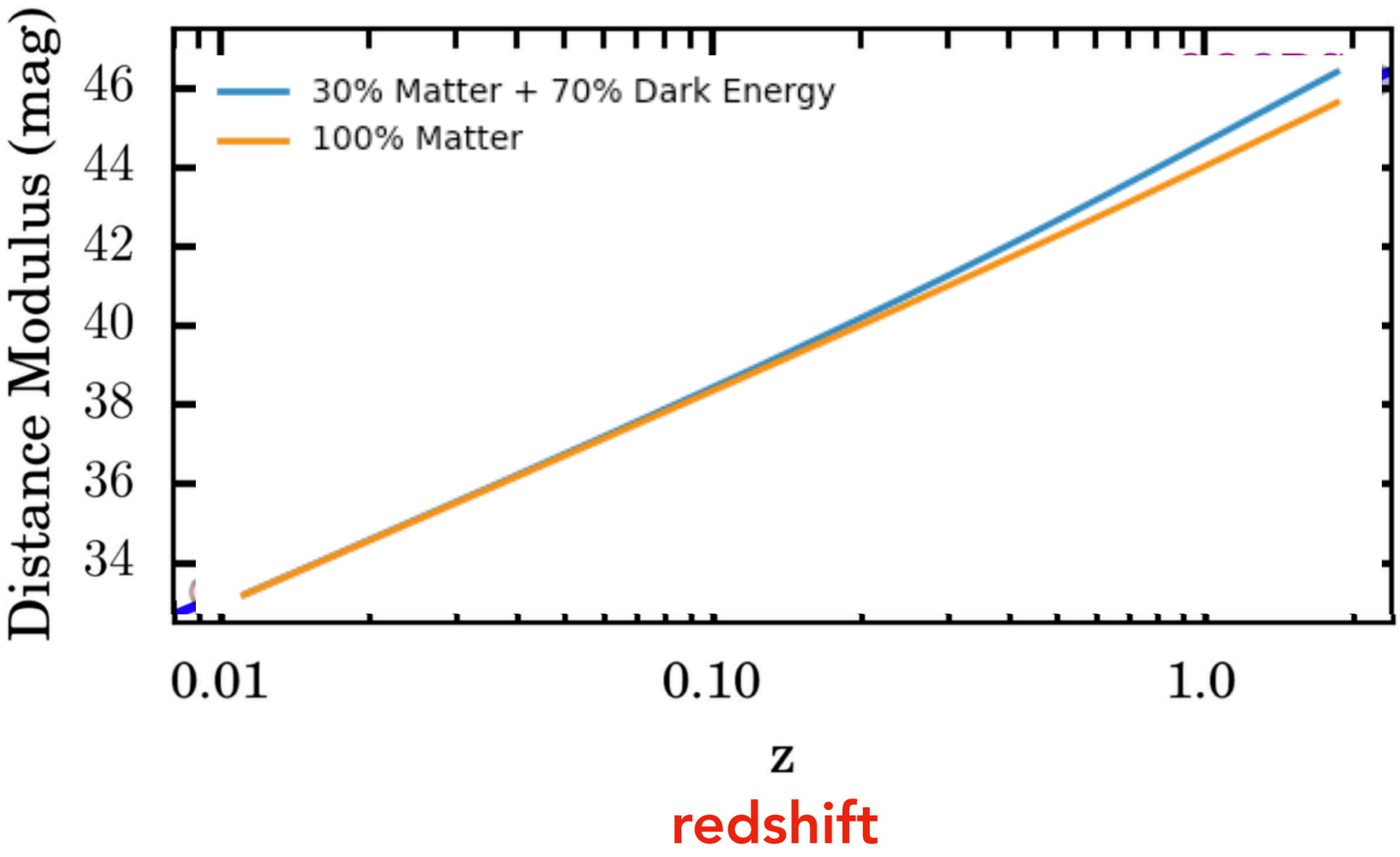


redshift

En fait, l'expansion **s'accélère !!**

Dernière version du diagramme d'Hubble de 2018

distances



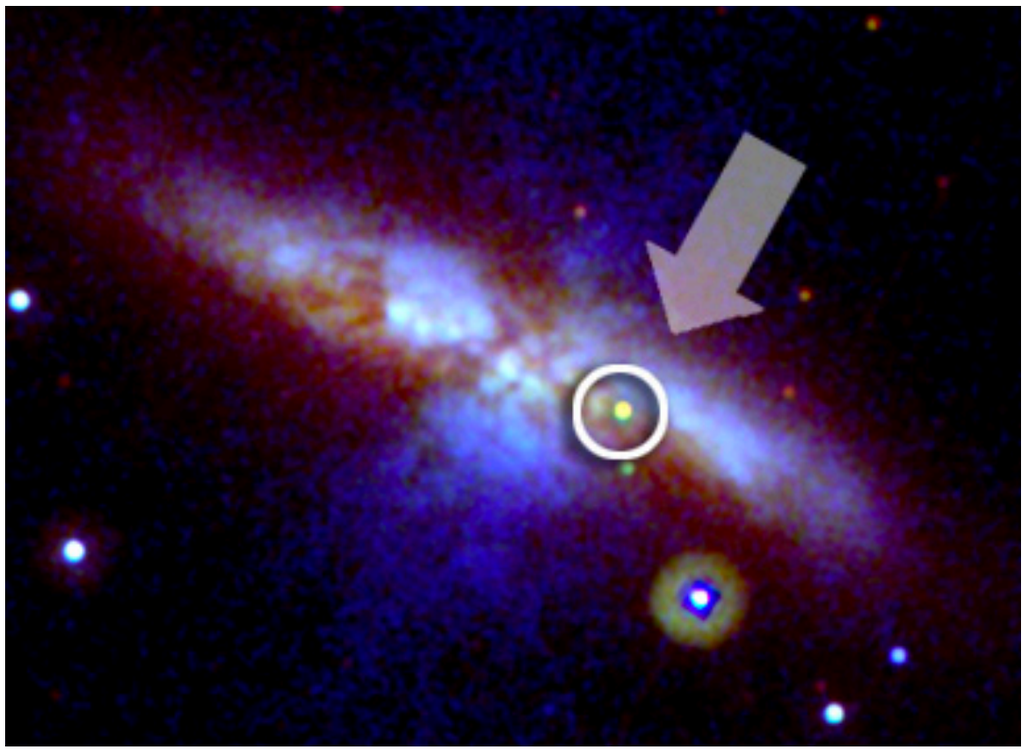
redshift

En fait, l'expansion **s'accélère !!**

mais c'est un subtil effet

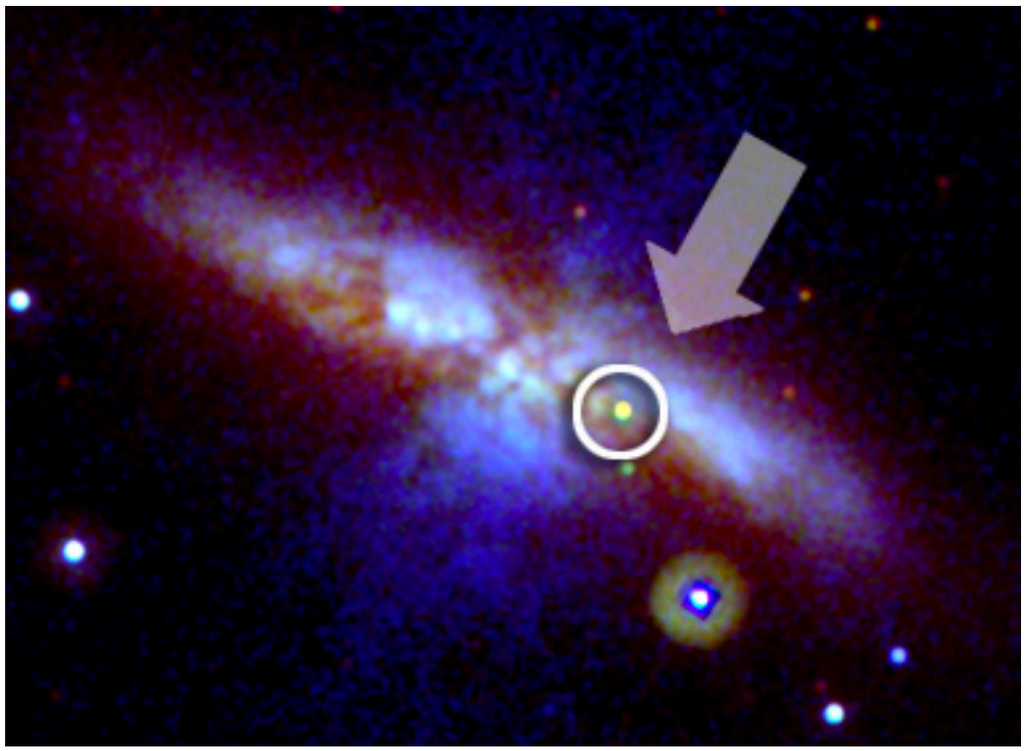
On utilise des **supernovae**
comme une chandelle standard

Explosion de supernova observée
dans une galaxie distante



On utilise des **supernovae**
comme une chandelle standard

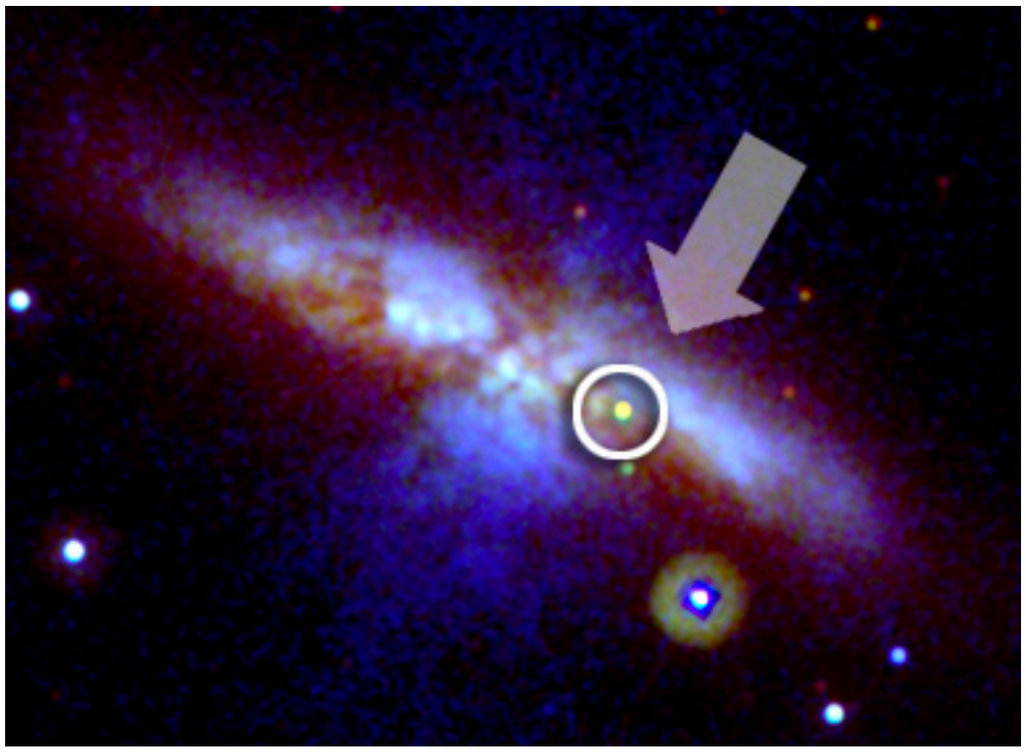
Explosion de supernova observée
dans une galaxie distante



Nous mesurons des **distances**
à partir de leur brillance

On utilise des **supernovae**
comme une chandelle standard

Explosion de supernova observée
dans une galaxie distante

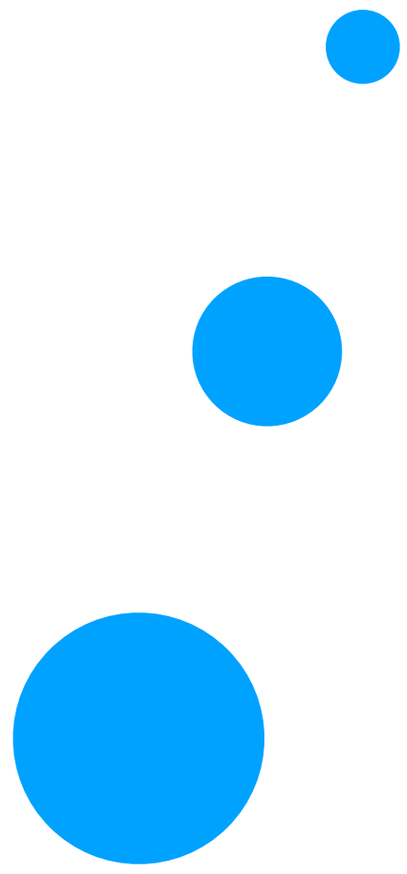


Nous mesurons des **distances**
à partir de leur brillance

Le Prix Nobel à été donné à ceux découvrant
l'acceleration de l'expansion

Comment on voit l'accélération ?

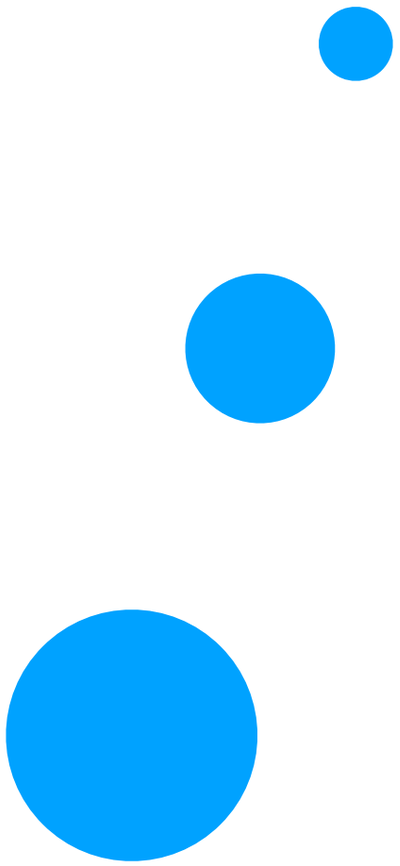
Pas d'expansion



Plus lointaines,
moins de lumière.
Pas de décalage
vers le rouge

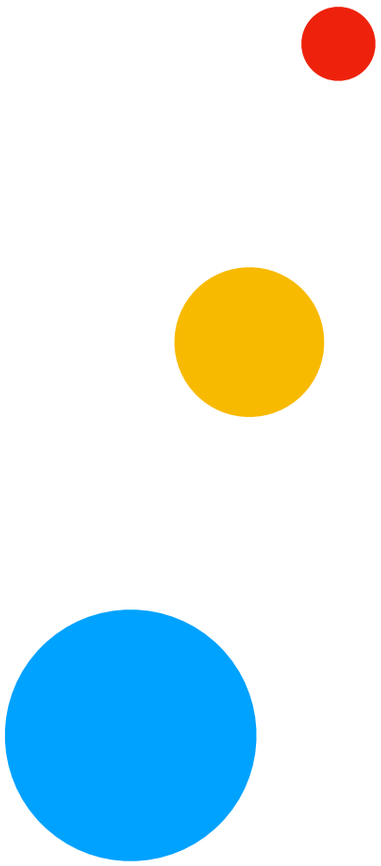
Comment on voit l'accélération ?

Pas d'expansion



Plus lointaines,
moins de lumière.
Pas de décalage
vers le rouge

Expansion
sans accélération

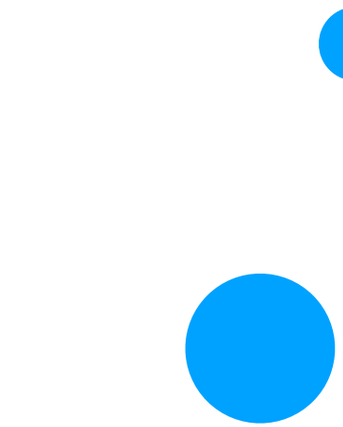


Avec décalage
vers le rouge

Sans énergie noire

Comment on voit l'accélération ?

Pas d'expansion



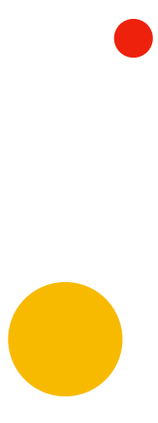
Plus lointaines,
moins de lumière.
Pas de décalage
vers le rouge

Expansion
sans accélération

Avec décalage
vers le rouge

Sans énergie noire

Expansion
avec accélération

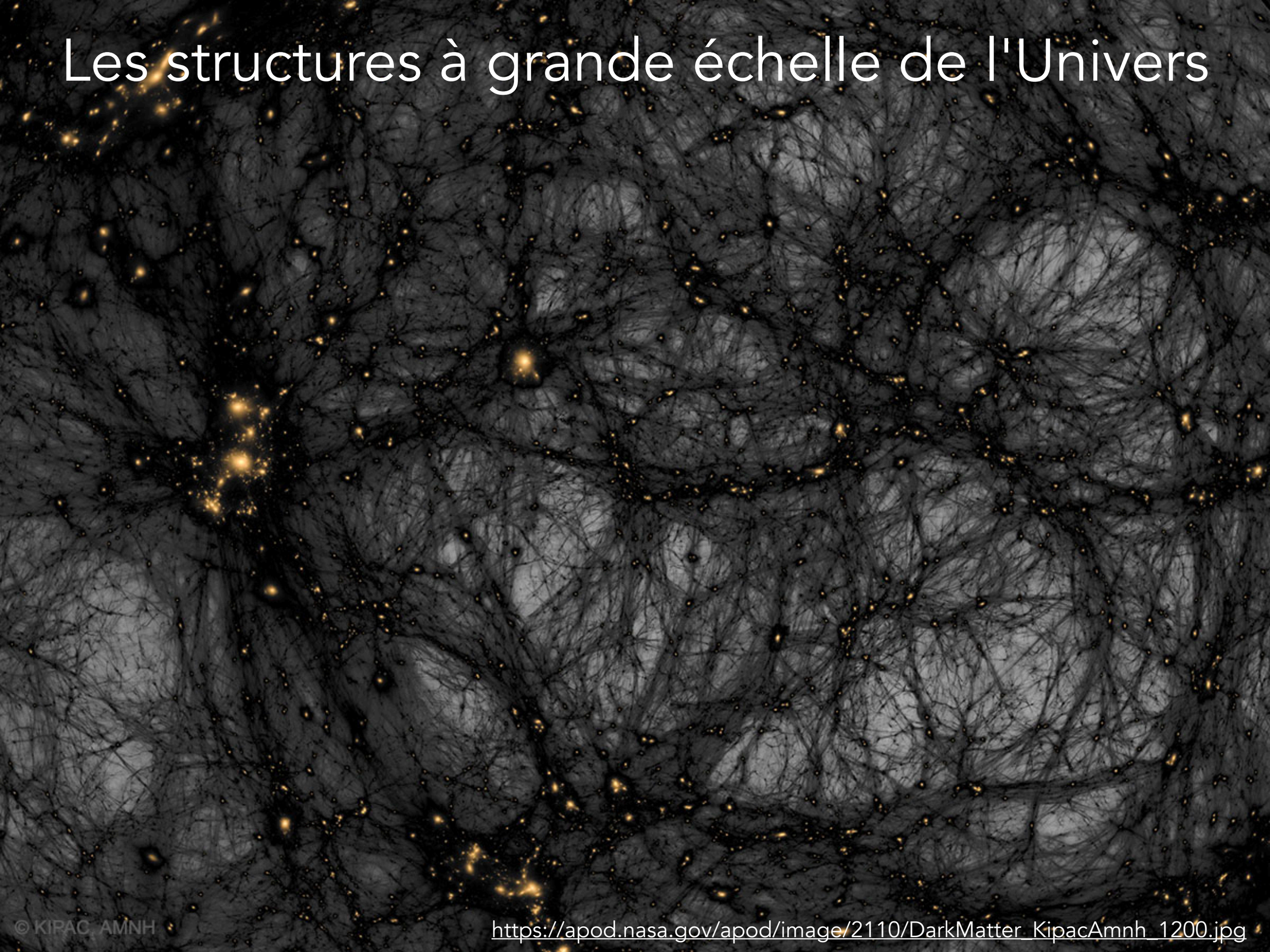


Même décalage vers le rouge,
mais objets plus lointains,
moins de lumière.

Avec énergie noire

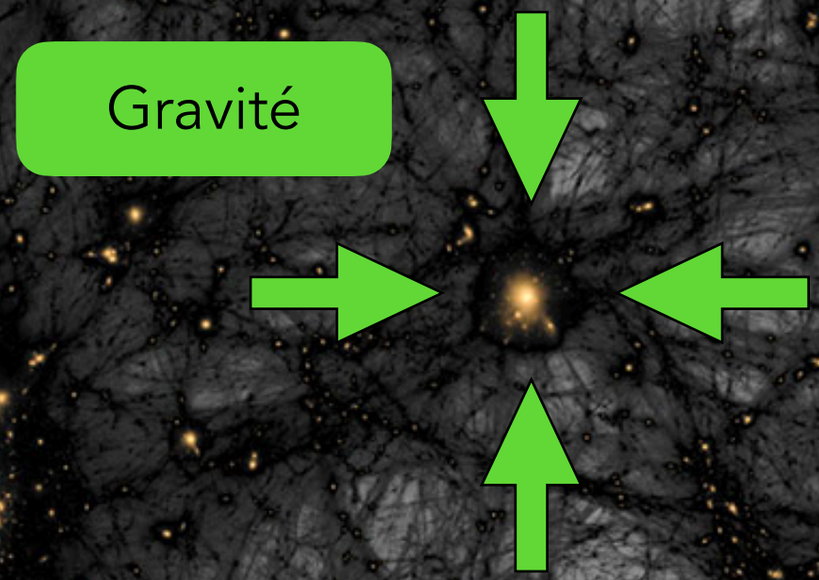
Est-ce qu'il y a une autre manière d'observer l'expansion de l'Univers ?

Les structures à grande échelle de l'Univers



https://apod.nasa.gov/apod/image/2110/DarkMatter_KipacAmnh_1200.jpg

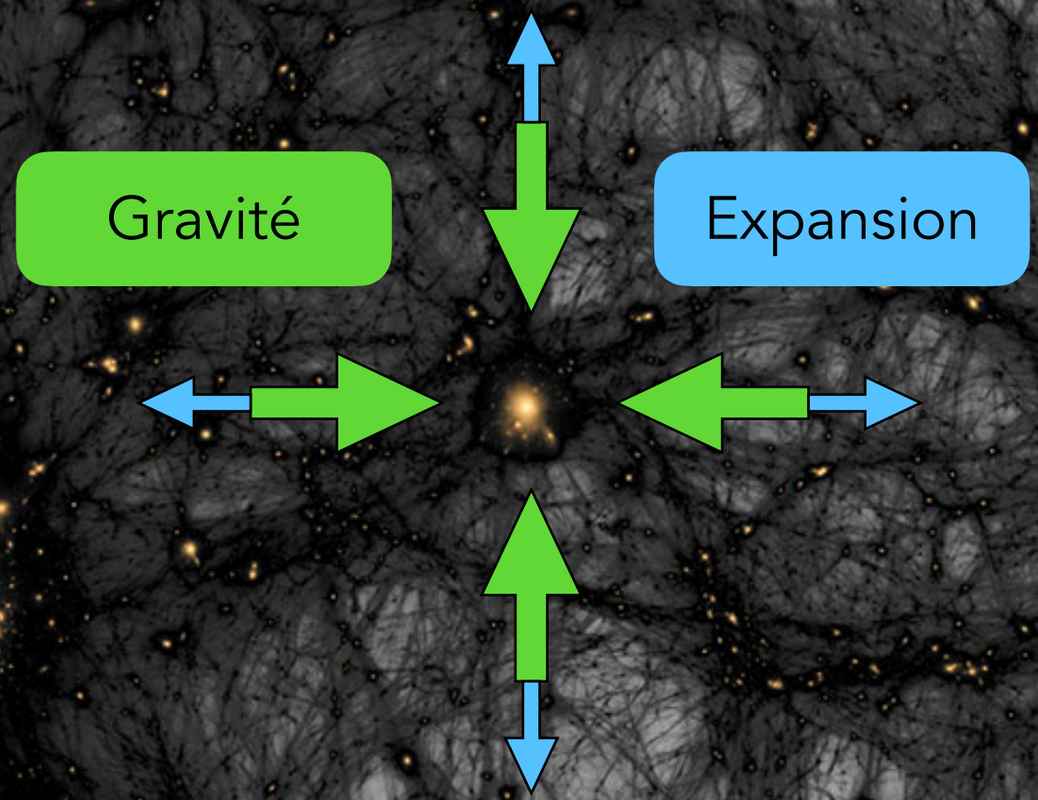
Les structures à grande échelle de l'Univers



© KIPAC, AMNH

https://apod.nasa.gov/apod/image/2110/DarkMatter_KipacAmnh_1200.jpg

Les structures à grande échelle de l'Univers



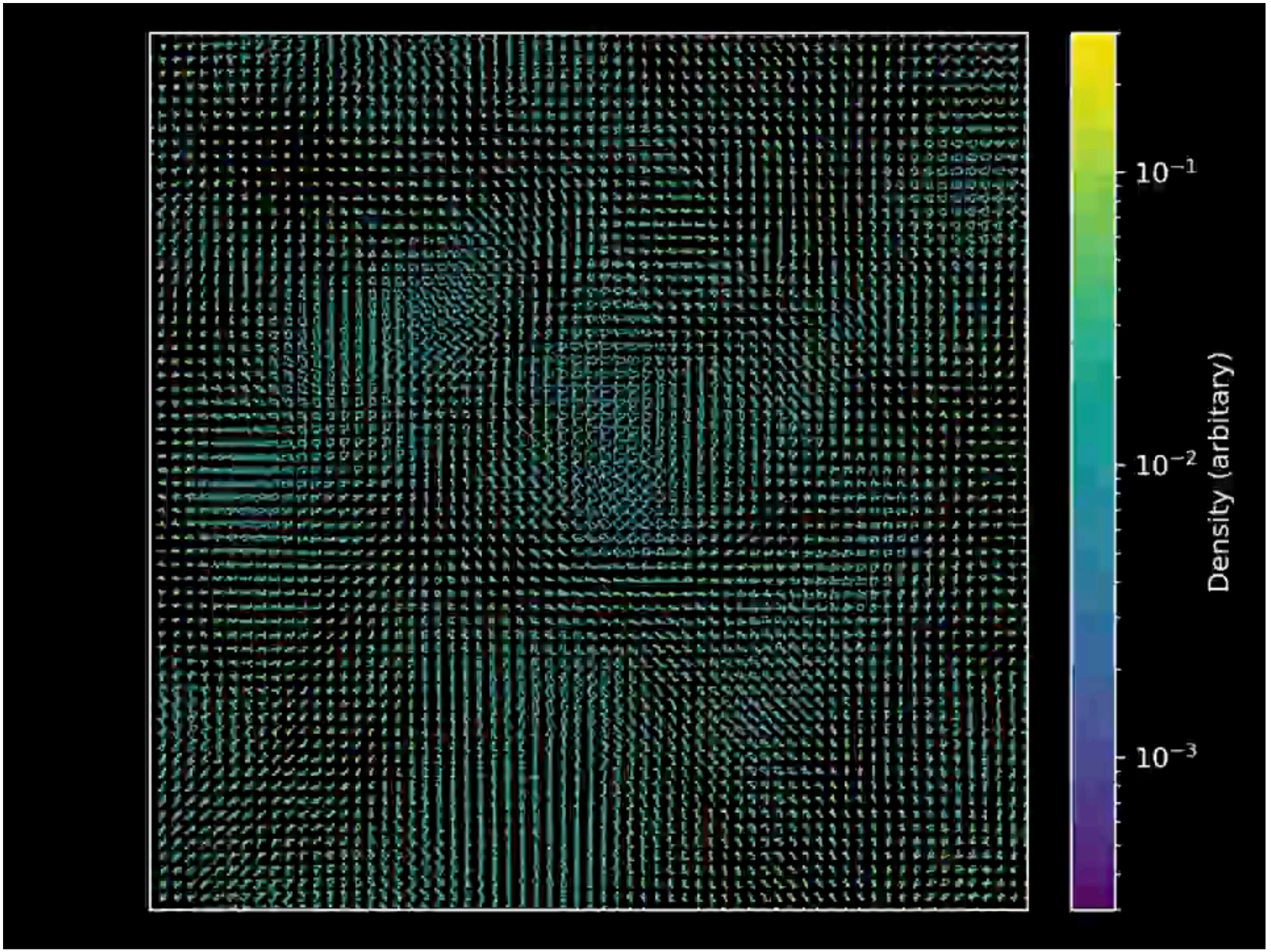
© KIPAC, AMNH

https://apod.nasa.gov/apod/image/2110/DarkMatter_KipacAmnh_1200.jpg

La bataille entre gravité et expansion

Simulation cosmologique à N corps

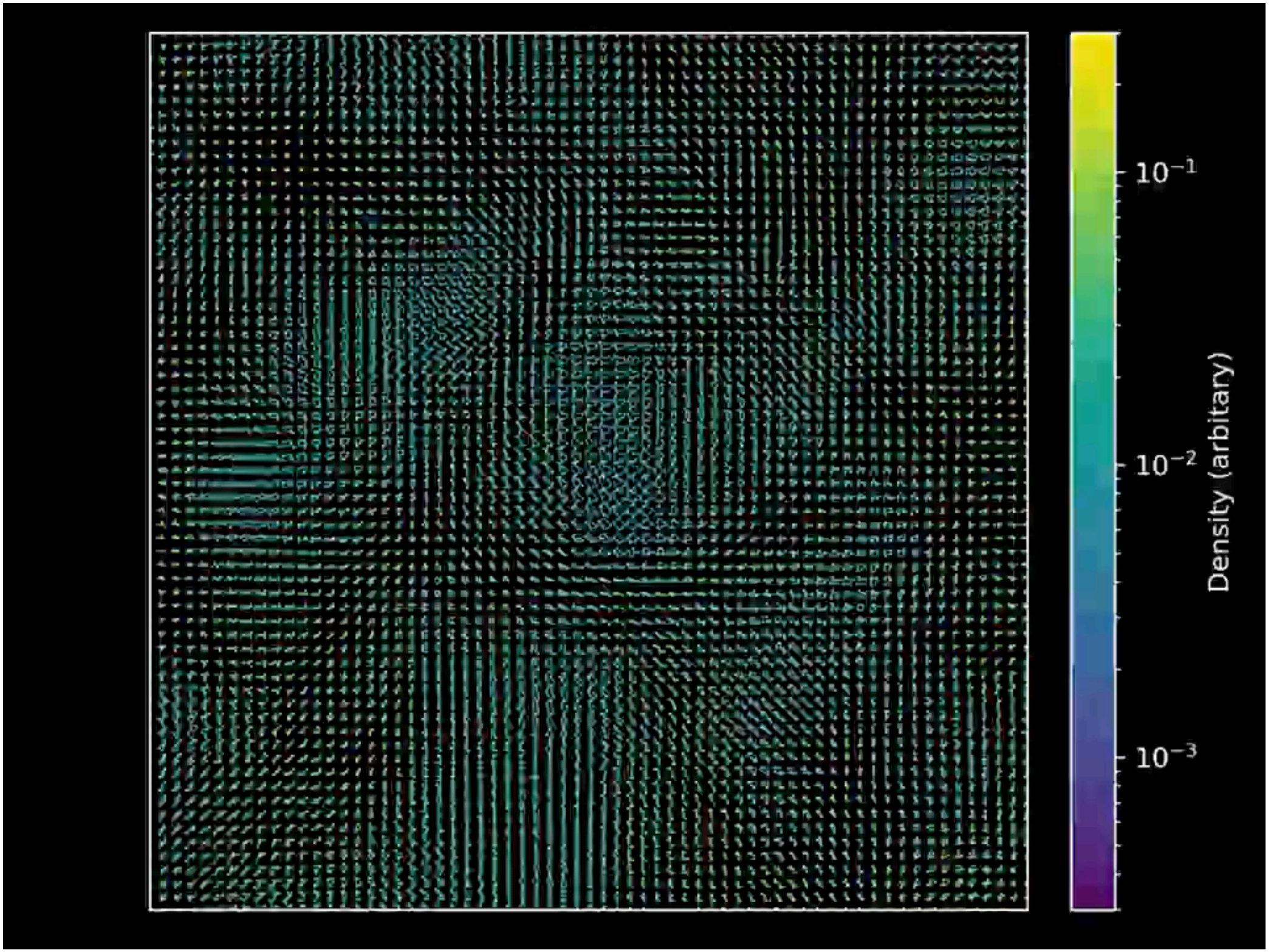
https://www.youtube.com/watch?v=D_xhW6P0xuM



La bataille entre gravité et expansion

Simulation cosmologique à N corps

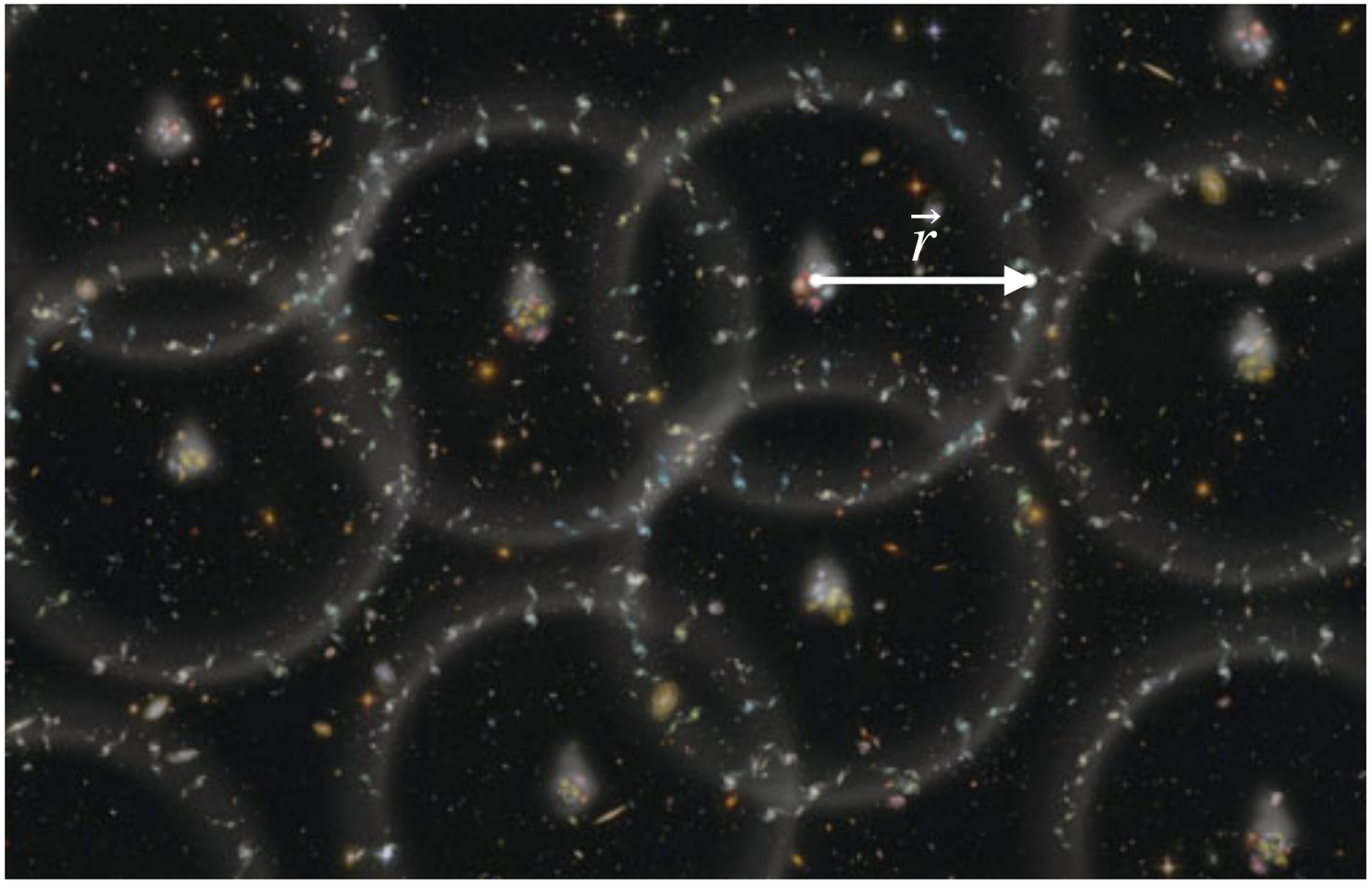
https://www.youtube.com/watch?v=D_xhW6P0xuM



Il y a une échelle cachée dans les structures,
une **règle standard** !

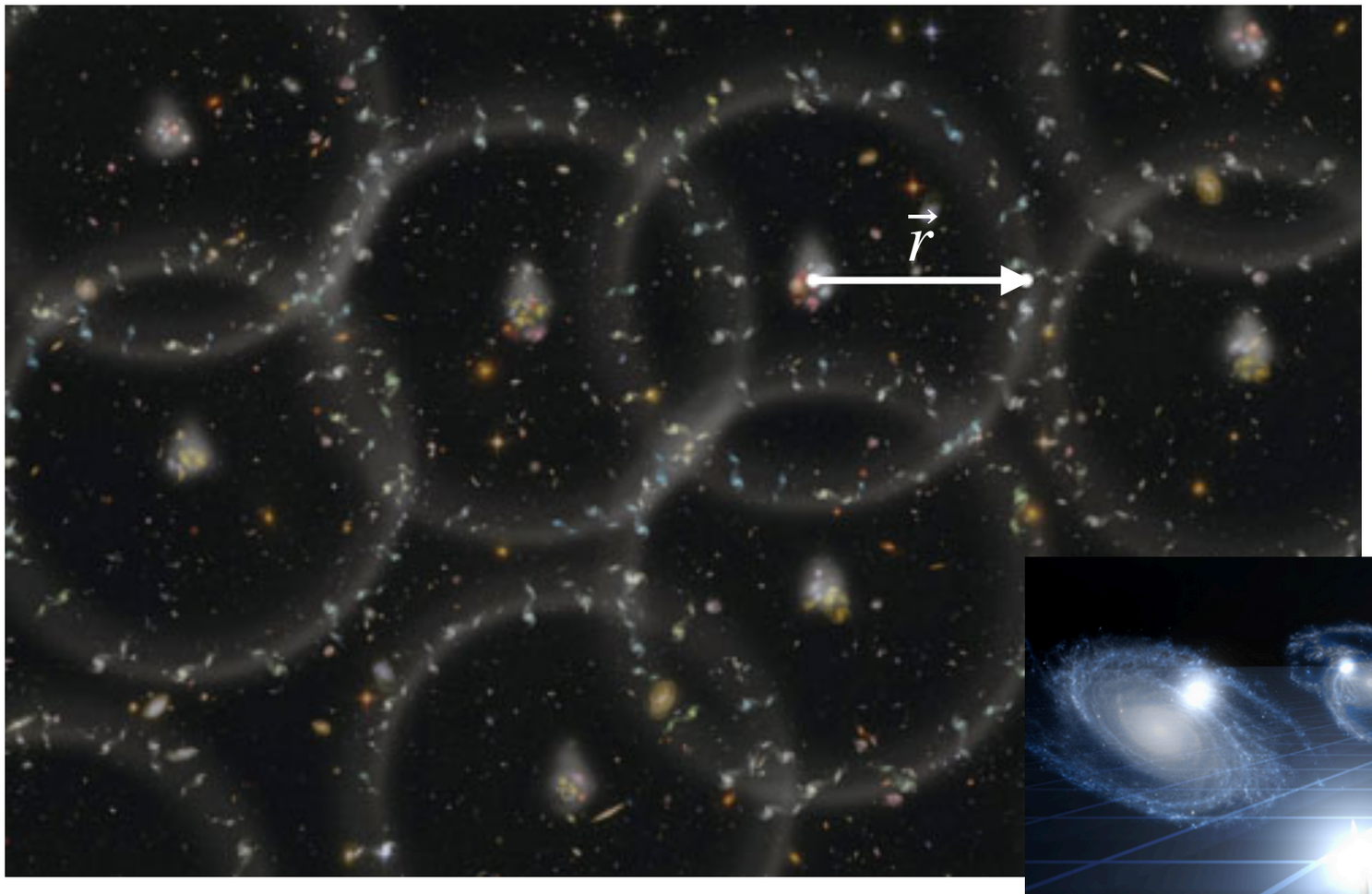
Il y a une échelle cachée dans les structures,
une **règle standard** !

Coquilles de 450 million light-years de rayon

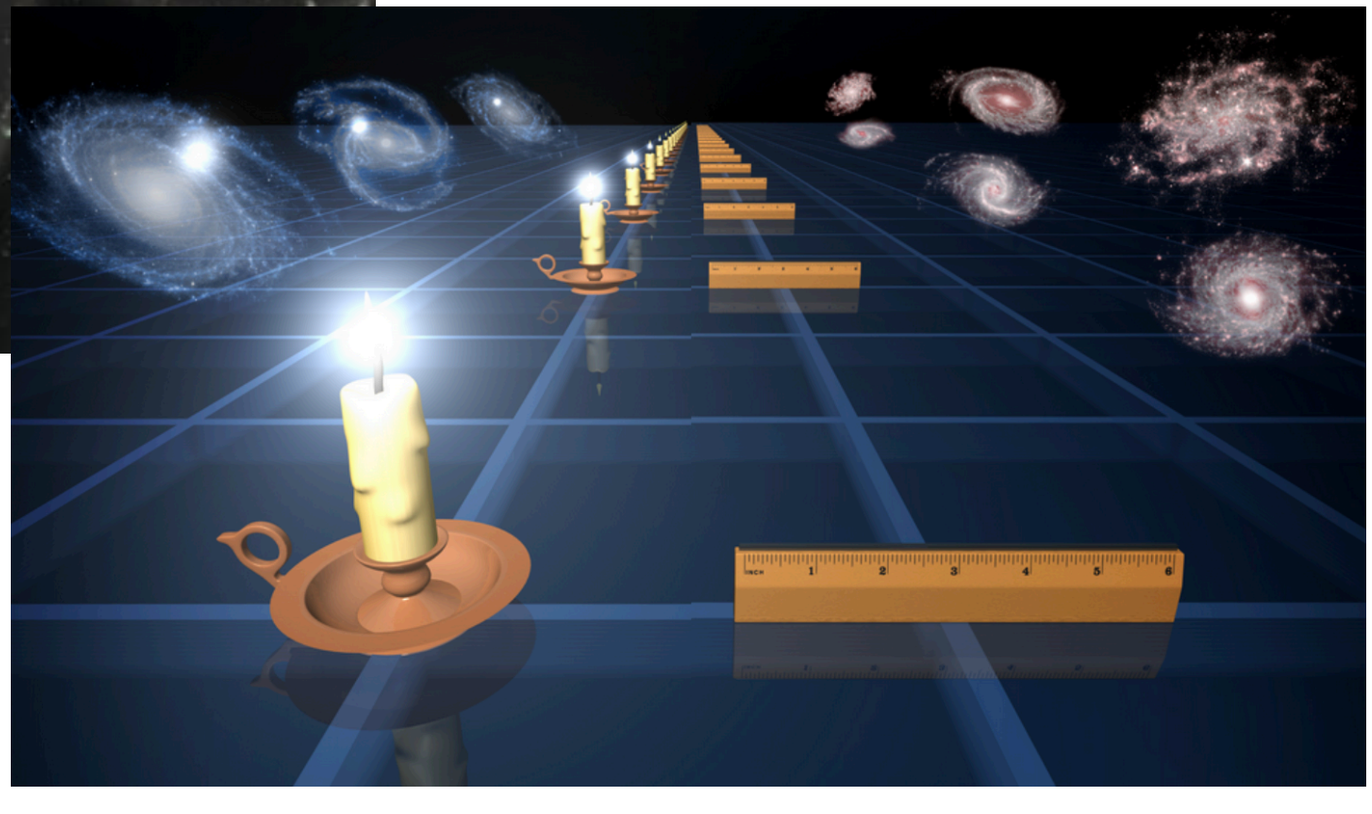


Il y a une échelle cachée dans les structures,
une **règle standard** !

Coquilles de 450 million light-years de rayon

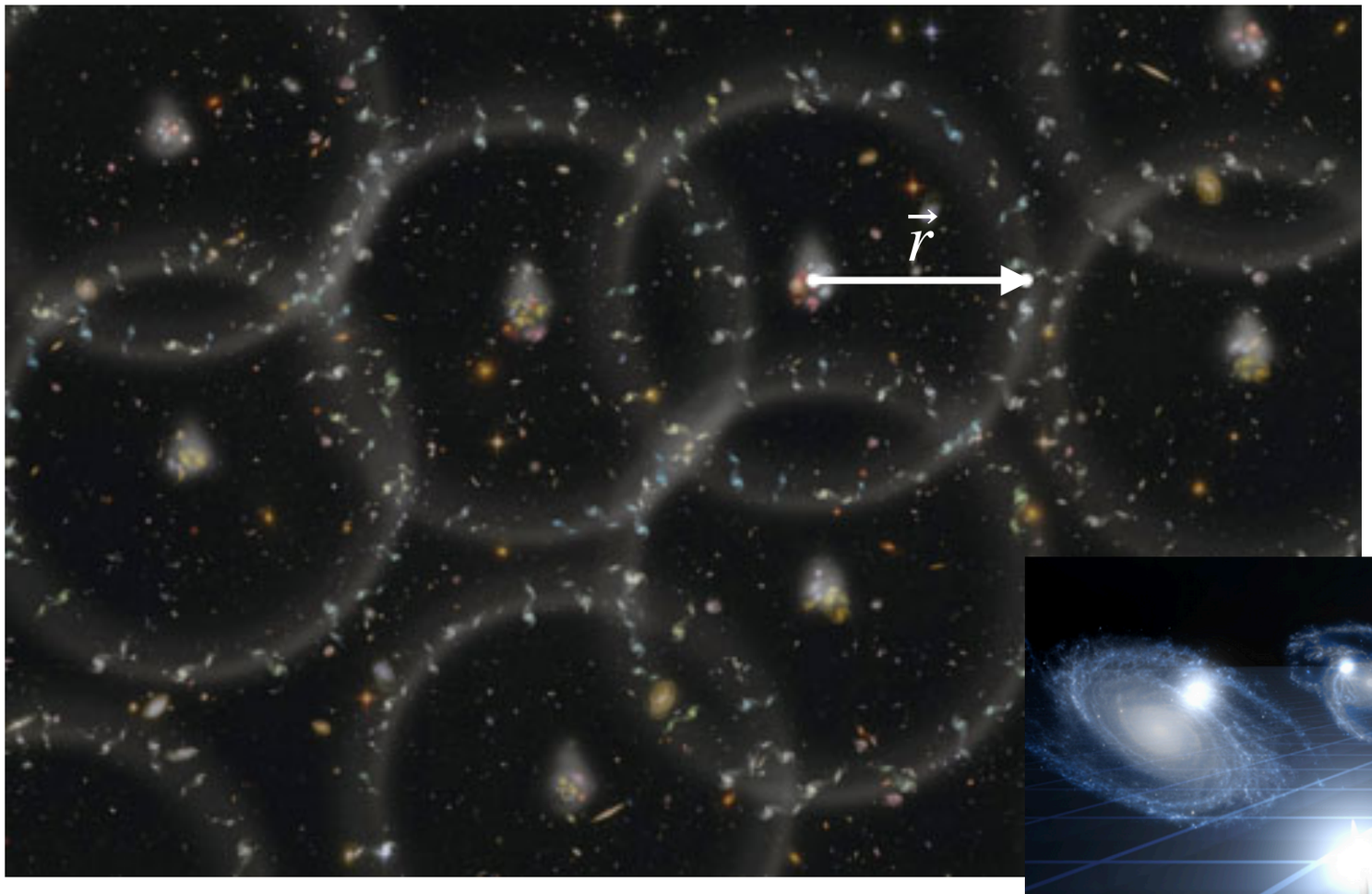


Par triangulation, on peut utiliser cette règle pour mesurer des **distances** !

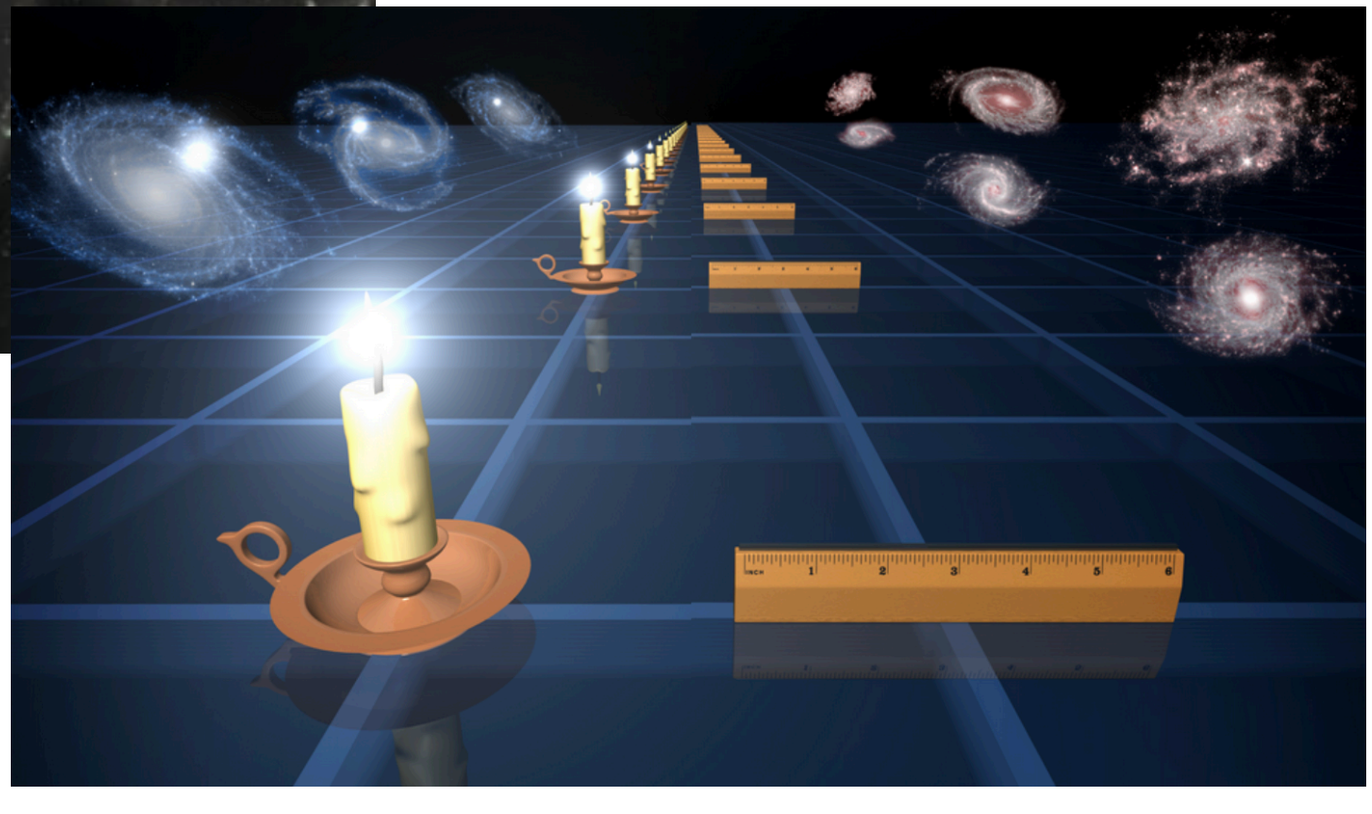


Il y a une échelle cachée dans les structures,
une **règle standard** !

Coquilles de 450 million light-years de rayon



Par triangulation, on peut utiliser cette règle pour mesurer des **distances** !



Existence de
l'énergie noire
re-confirmée !

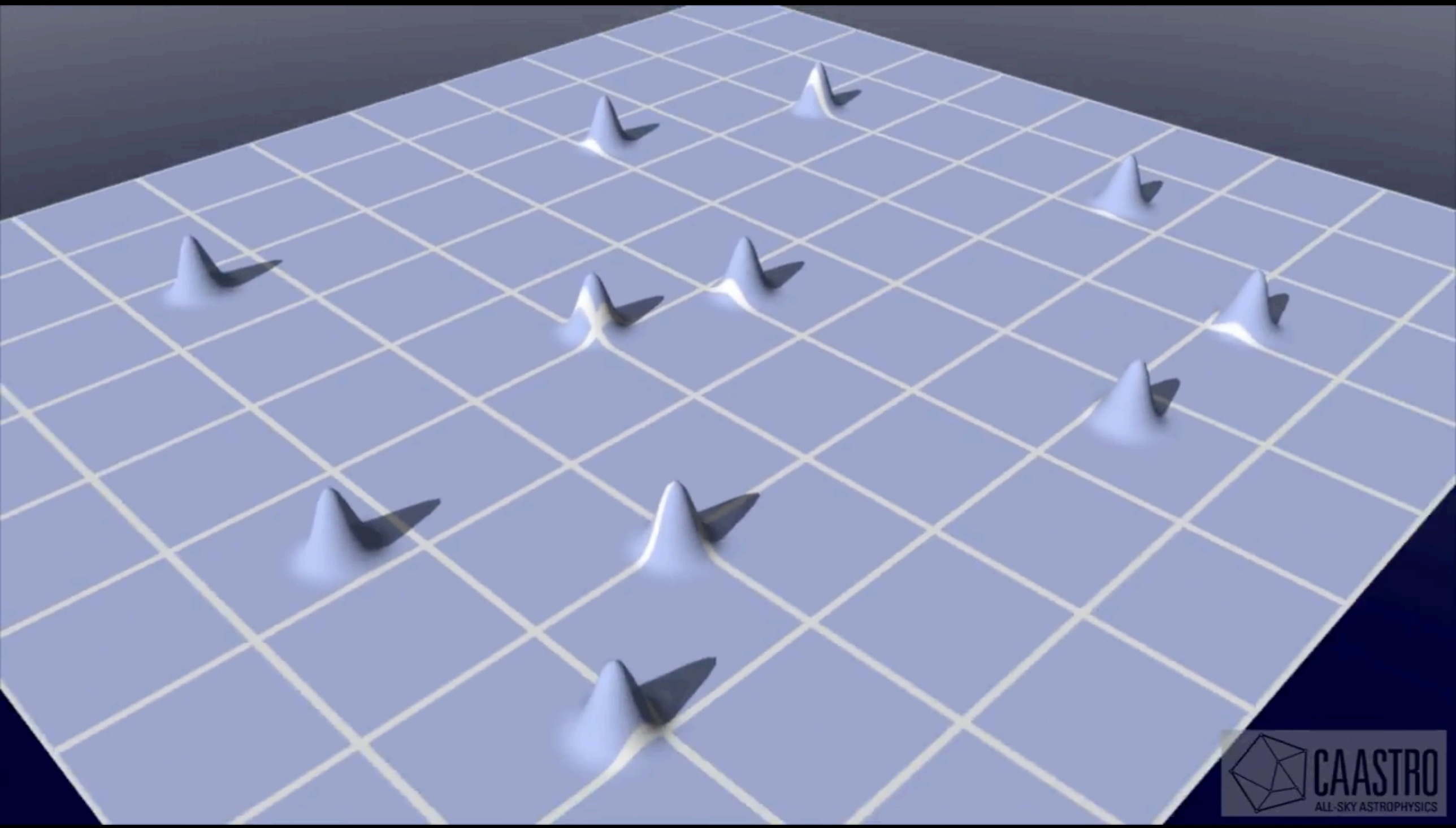
D'où vient cette **règle standard** ?

Vagues dans le plasma primordial !

D'où vient cette **règle standard** ?

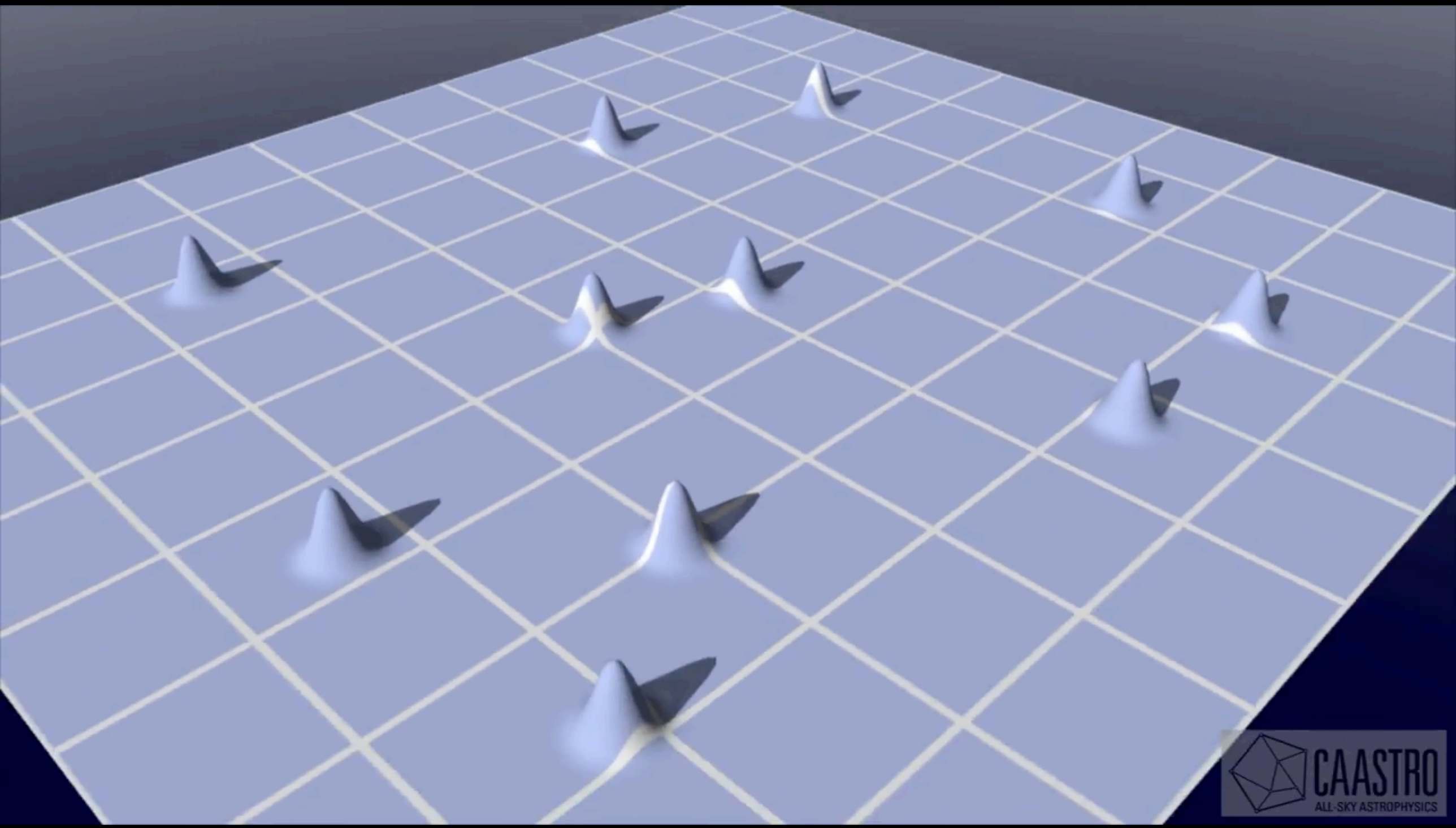
Vagues dans le plasma primordial !

Comment mesurer cette règle standard ?



On compte les paires sur une carte 3D des galaxies !

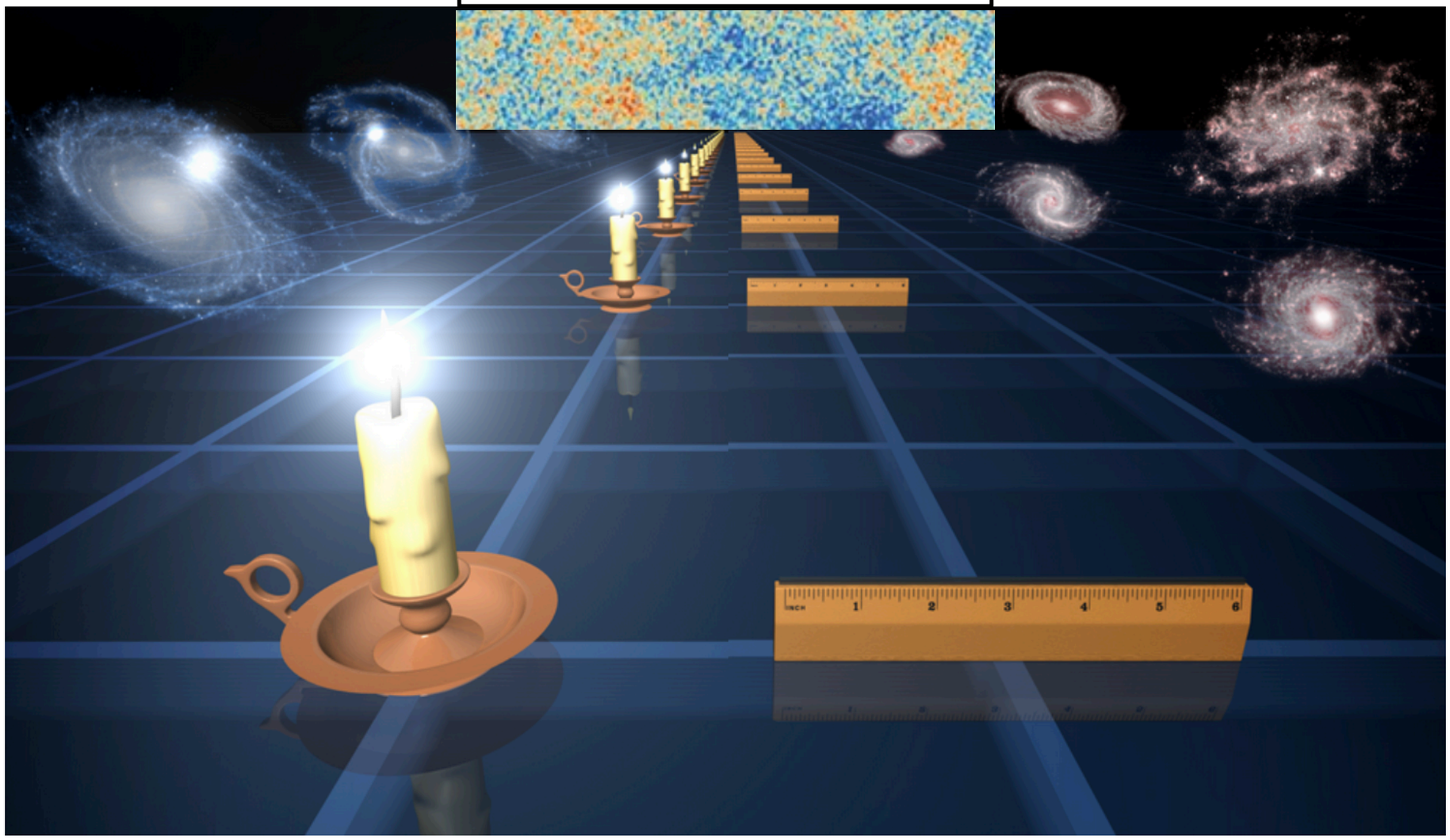
Comment mesurer cette règle standard ?



On compte les paires sur une carte 3D des galaxies !

Les sondes cosmologiques de l'expansion

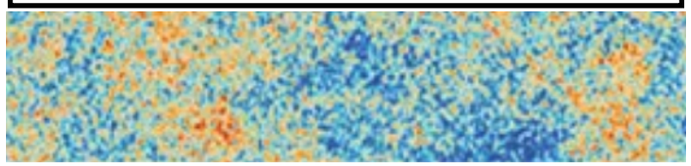
Fond diffus cosmologique
t ~ 380 000 ans



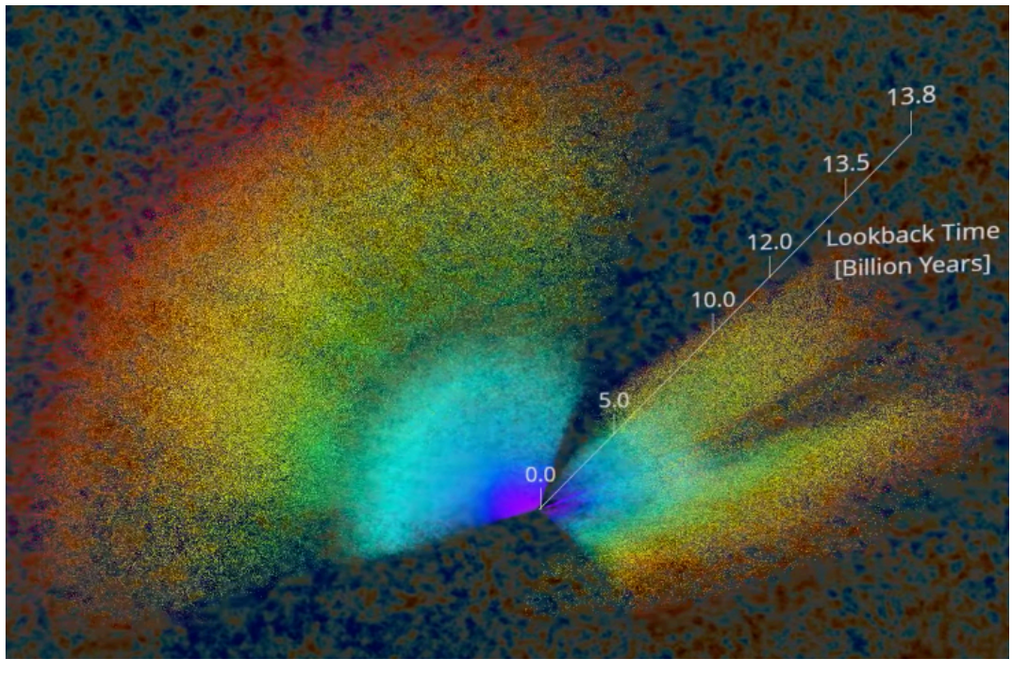
Supernovae Chandelles standard 5 Ga < t < 13.8 Ga	Vagues dans le plasma primordial Règle standard 3 Ga < t < 13 Ga

Les sondes cosmologiques de l'expansion et de la gravité

Fond diffus cosmologique
t ~ 380 000 ans



Cartes 3D des galaxies
4 Ga < t < 13.8 Ga



Lentillage gravitationnel
6 Ga < t < 13.8 Ga

Télescopes de la prochaine décennie

Telescope avec miroir de 4m
5000 spectres à la fois
~ 20 million de galaxies en 3D
2021-2026

DARK ENERGY SPECTROSCOPIC INSTRUMENT

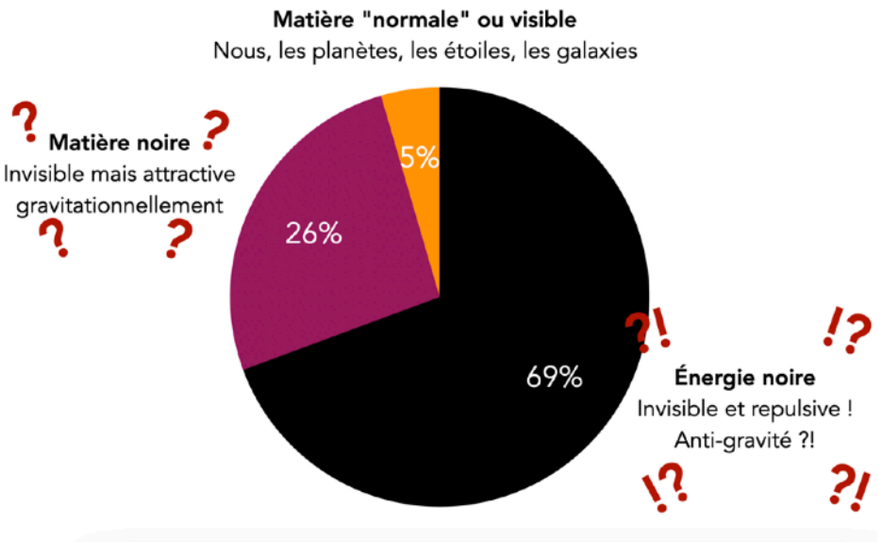
Satellite avec
miroir de 2m
~30 million de galaxies en 3D
2023 - 2028

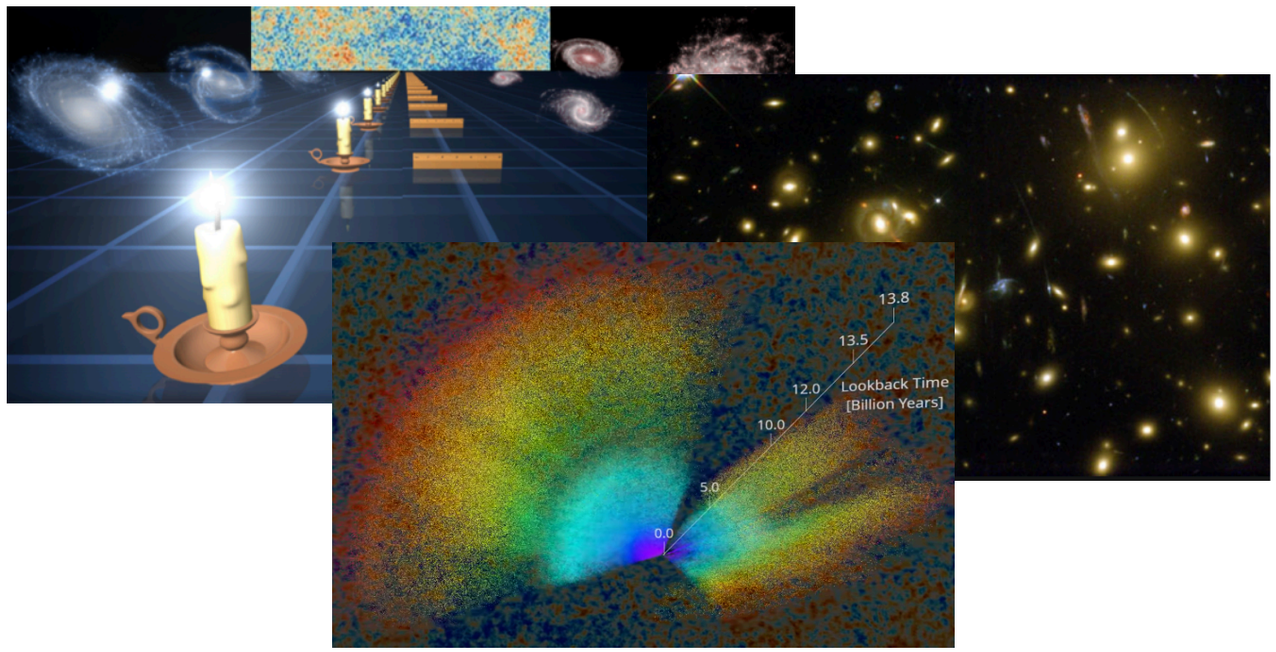
Telescope avec miroir de 8.4m
Plus grande caméra du monde
~ 300k supernovae
Lentillage gravitationnel
2023 - 2033

Rubin Observatory

Participation du CPPM et d'Aix-Marseille Université

La cosmologie : l'étude des mystères de l'Univers





Mathématiques

Physique

Informatique

Mécanique
Électronique

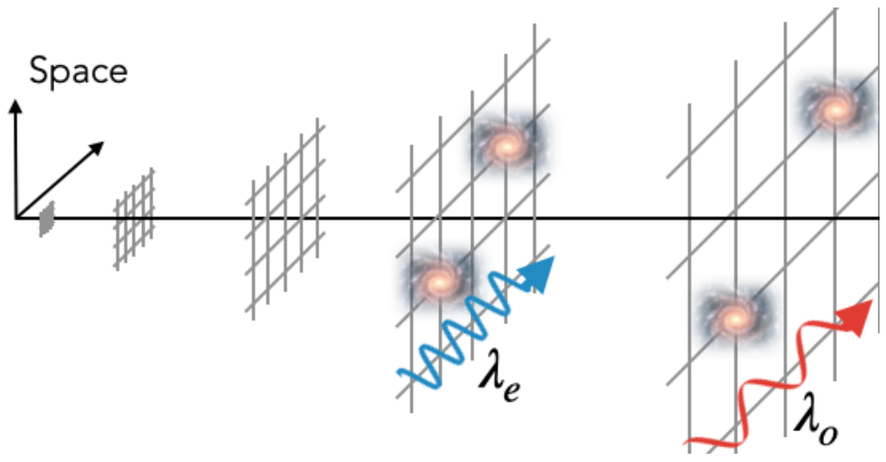
Génie
spatiale

Enseignement

Le futur c'est à vous

Comment on fait une carte 3D de l'Univers ?

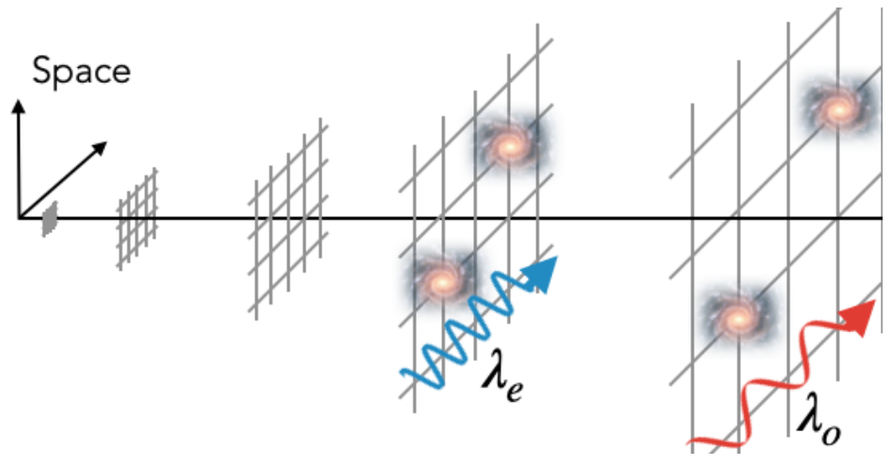
Mesure des décalages vers le rouge (**redshifts**)



(source: wikipedia)

Plus la galaxie est **lointaine**, plus sont **redshift** est grand !

Mesure des décalages vers le rouge (**redshifts**)

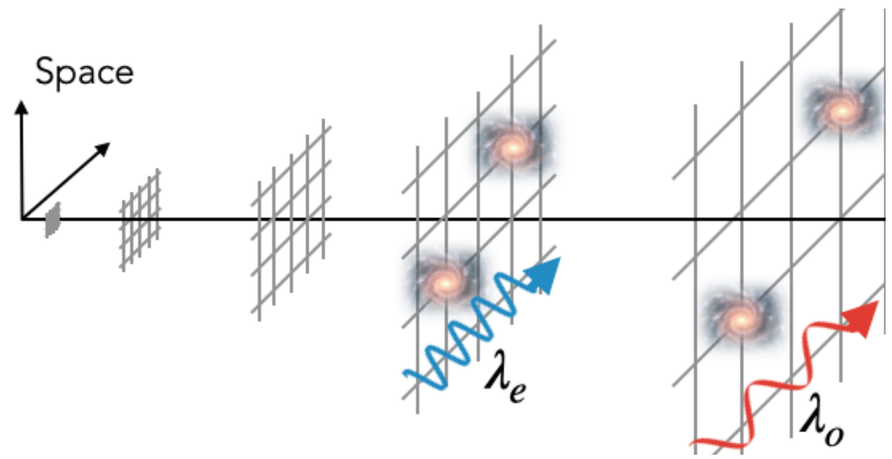


Galaxie

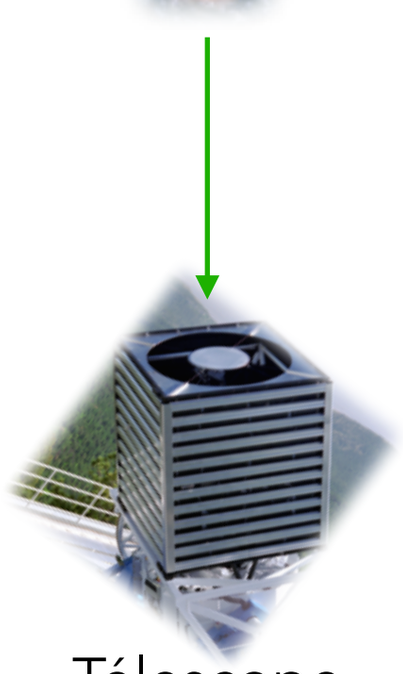
(source: wikipedia)

Plus la galaxie est **lointaine**, plus sont **redshift** est grand !

Mesure des décalages vers le rouge (**redshifts**)



Galaxie

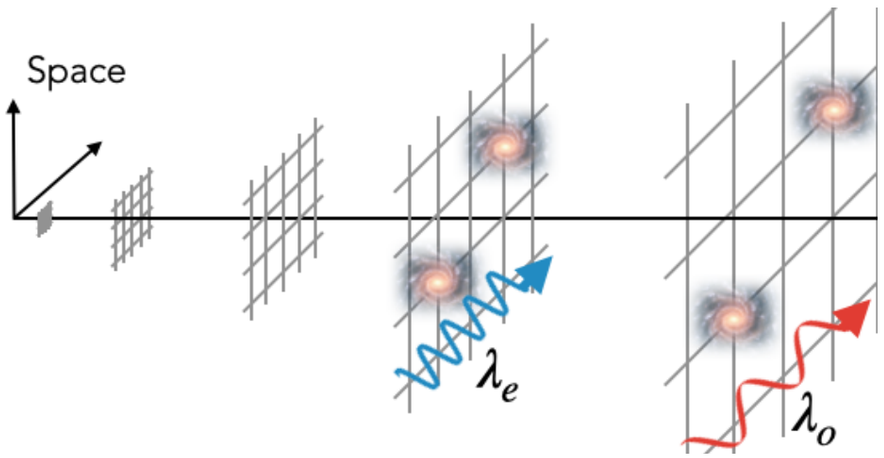


Télescope

(source: wikipedia)

Plus la galaxie est **lointaine**, plus sont **redshift** est grand !

Mesure des décalages vers le rouge (**redshifts**)



Galaxie

Télescope

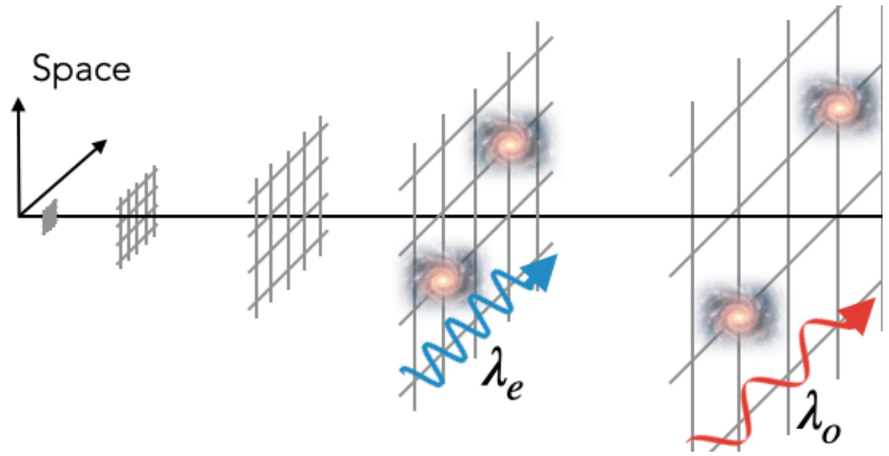
Diviser la lumière en spectre

(source: Pink Floyd)

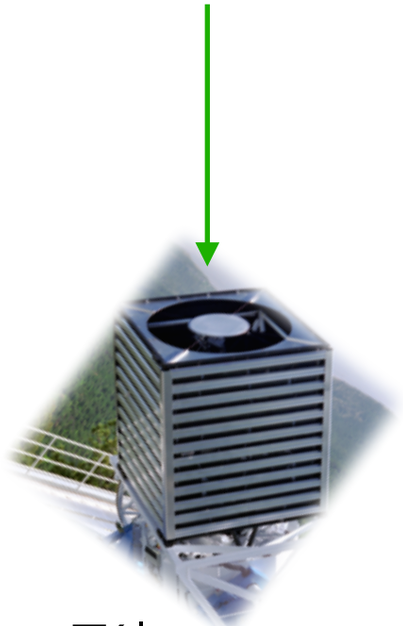
(source: wikipedia)

Plus la galaxie est **lointaine**, plus sont **redshift** est grand !

Mesure des décalages vers le rouge (**redshifts**)

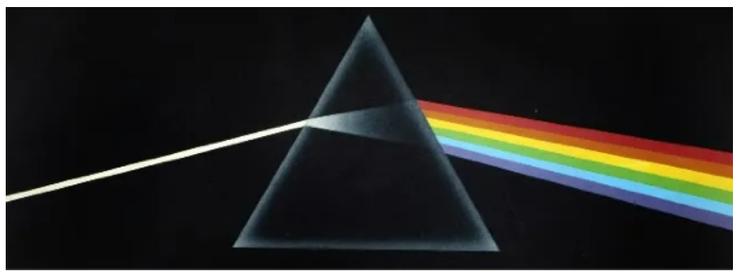


Galaxie



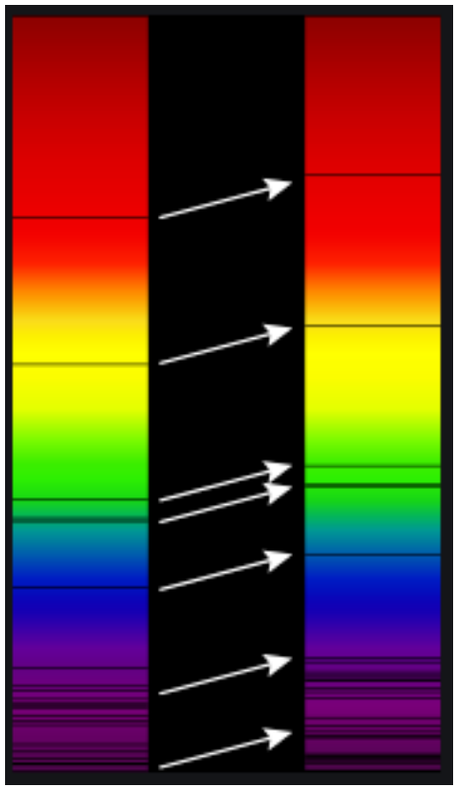
Télescope

Diviser la lumière en spectre



(source: Pink Floyd)

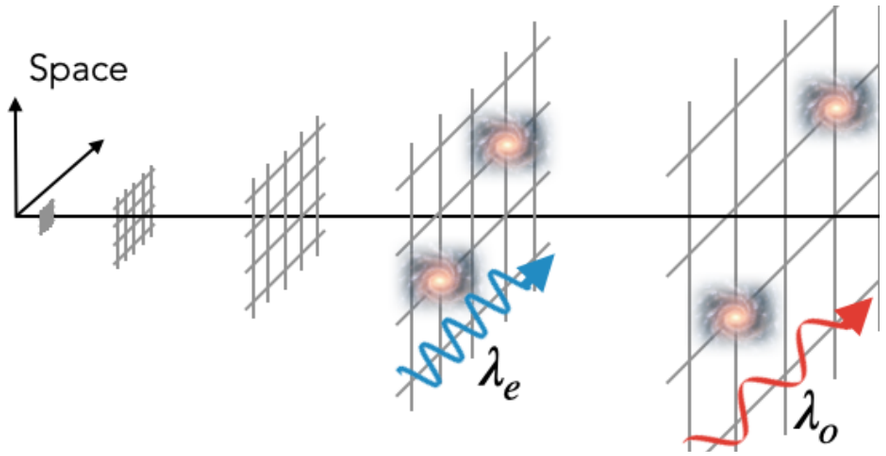
repos observé



(source: wikipedia)

Plus la galaxie est **lointaine**, plus sont **redshift** est grand !

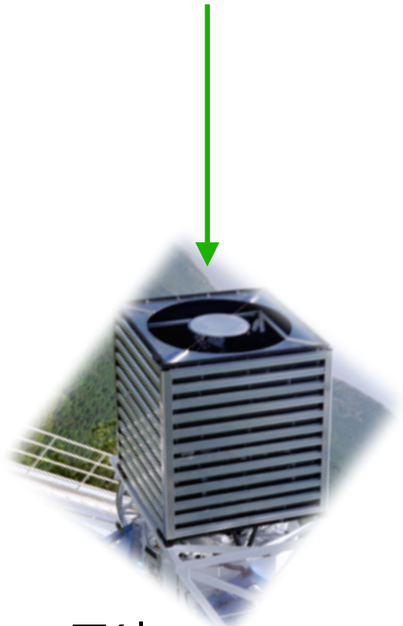
Mesure des décalages vers le rouge (**redshifts**)



Rapport des longueur d'onde

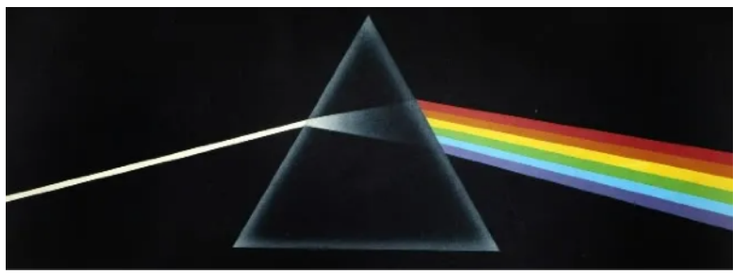
$$z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 = \frac{1}{a(t)} - 1$$

Galaxie



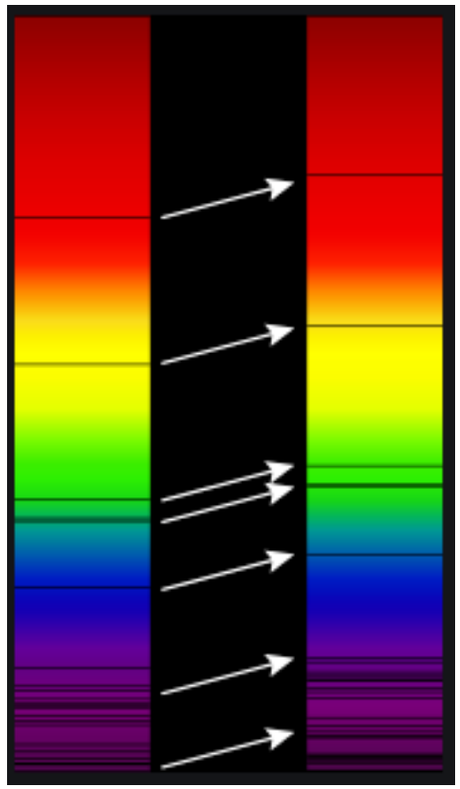
Télescope

Diviser la lumière en spectre



(source: Pink Floyd)

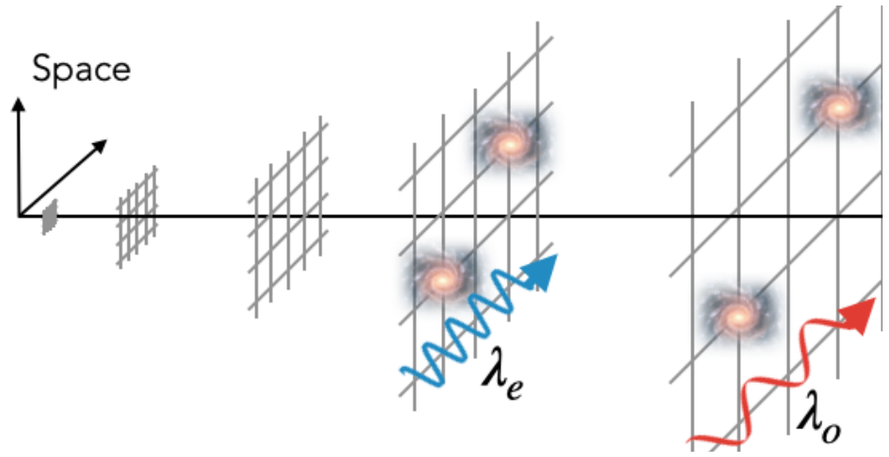
repos observé



(source: wikipedia)

Plus la galaxie est **lointaine**, plus sont **redshift** est grand !

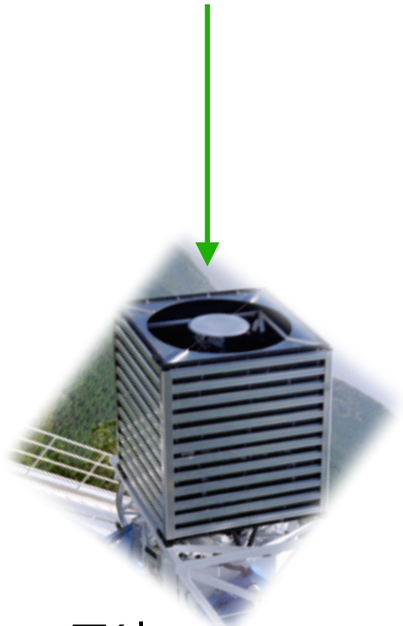
Mesure des décalages vers le rouge (**redshifts**)



Rapport des longueur d'onde

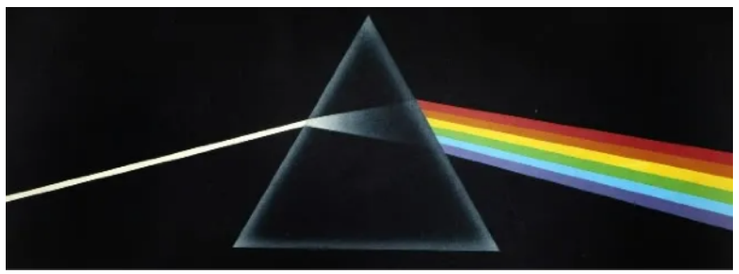
$$z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 = \frac{1}{a(t)} - 1$$

Galaxie



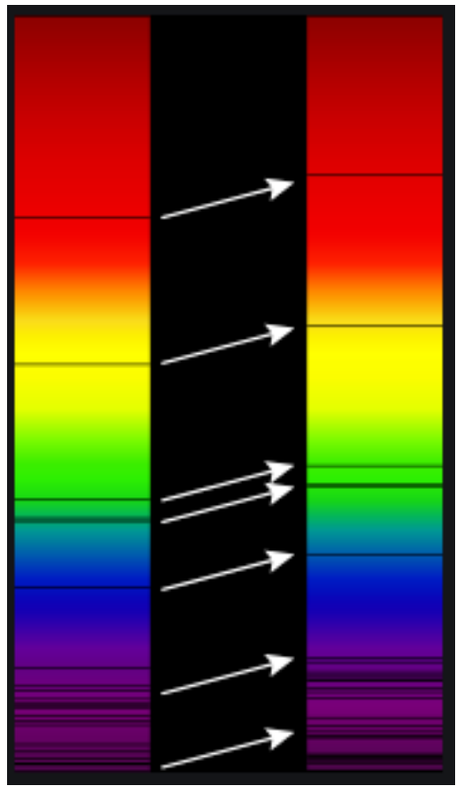
Télescope

Diviser la lumière en spectre



(source: Pink Floyd)

repos observé



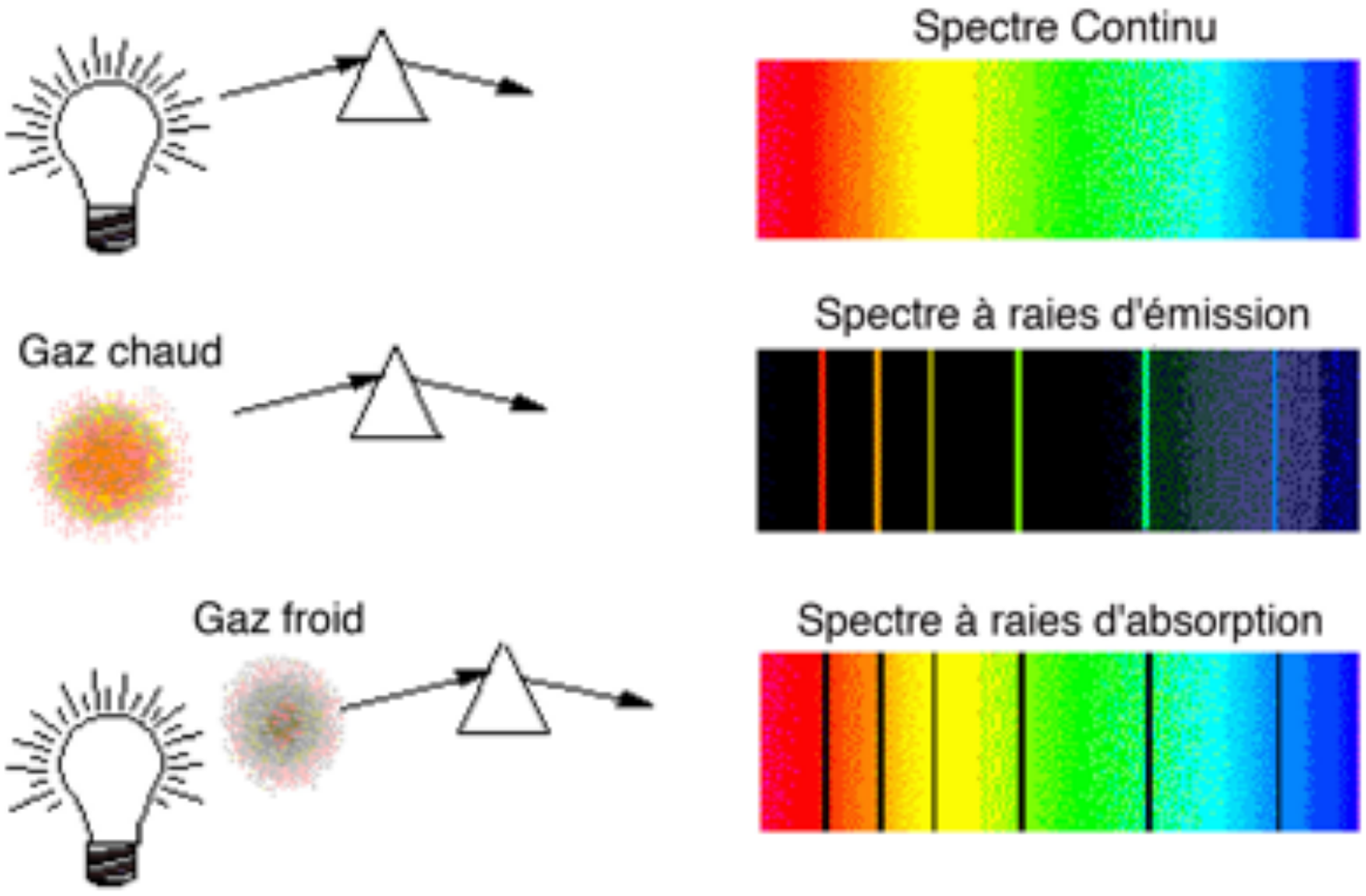
(source: wikipedia)

Redshift

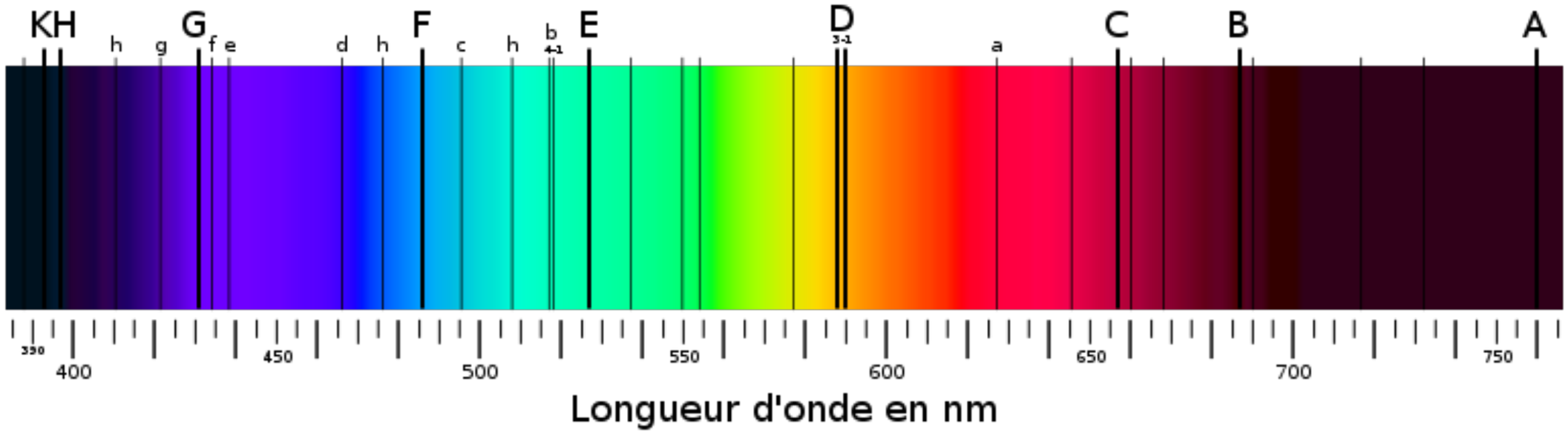
z

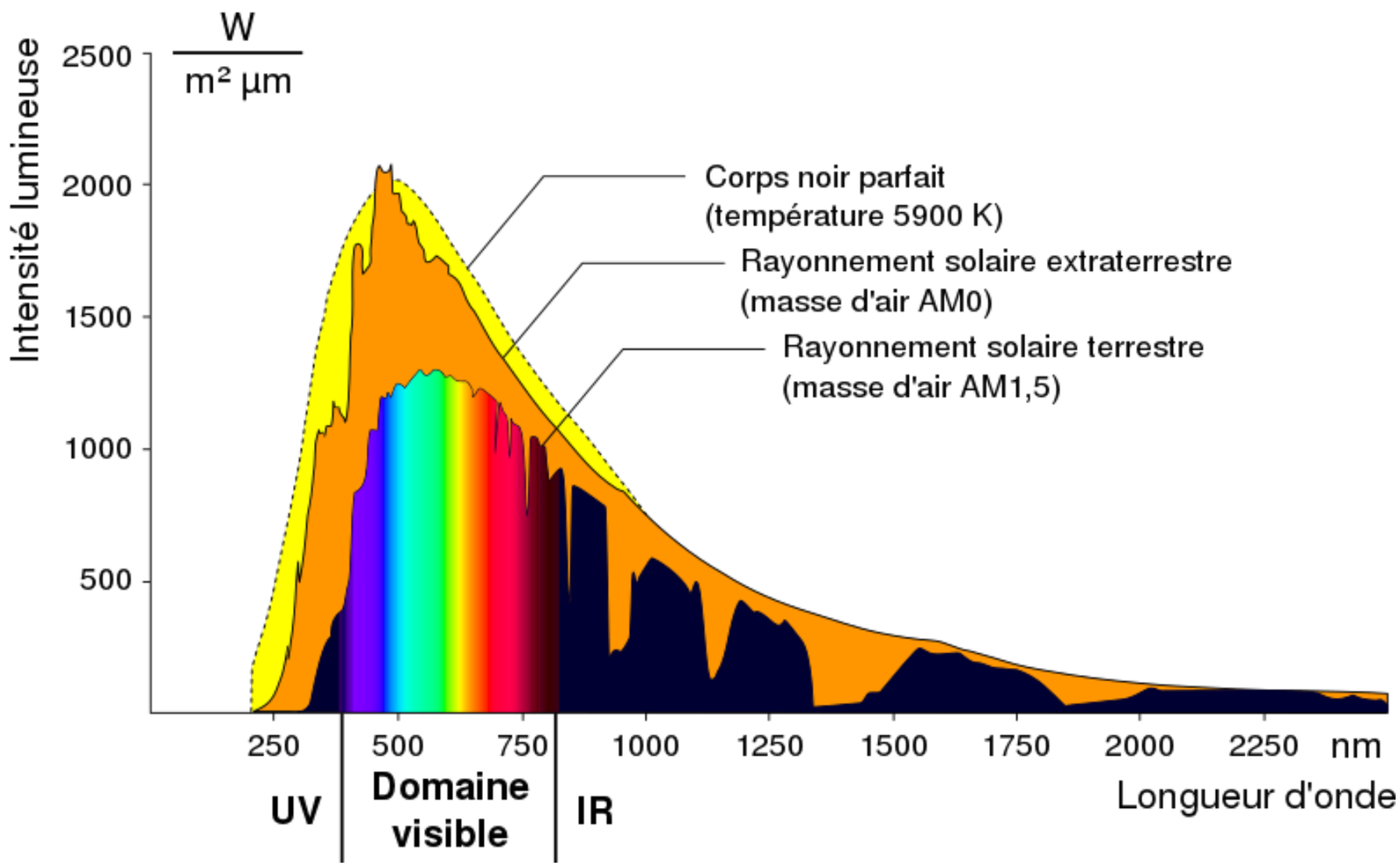
Plus la galaxie est **lointaine**, plus sont **redshift** est grand !

Types de spectres

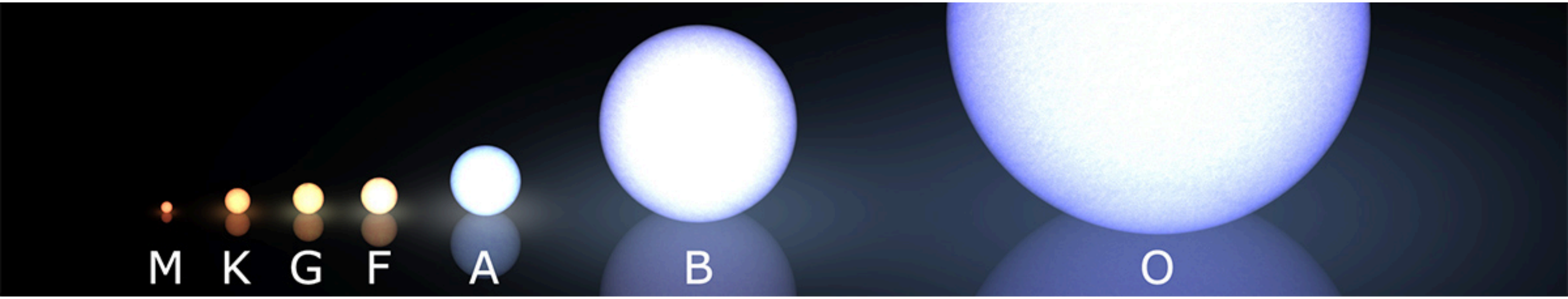


Exemple - Le Soleil

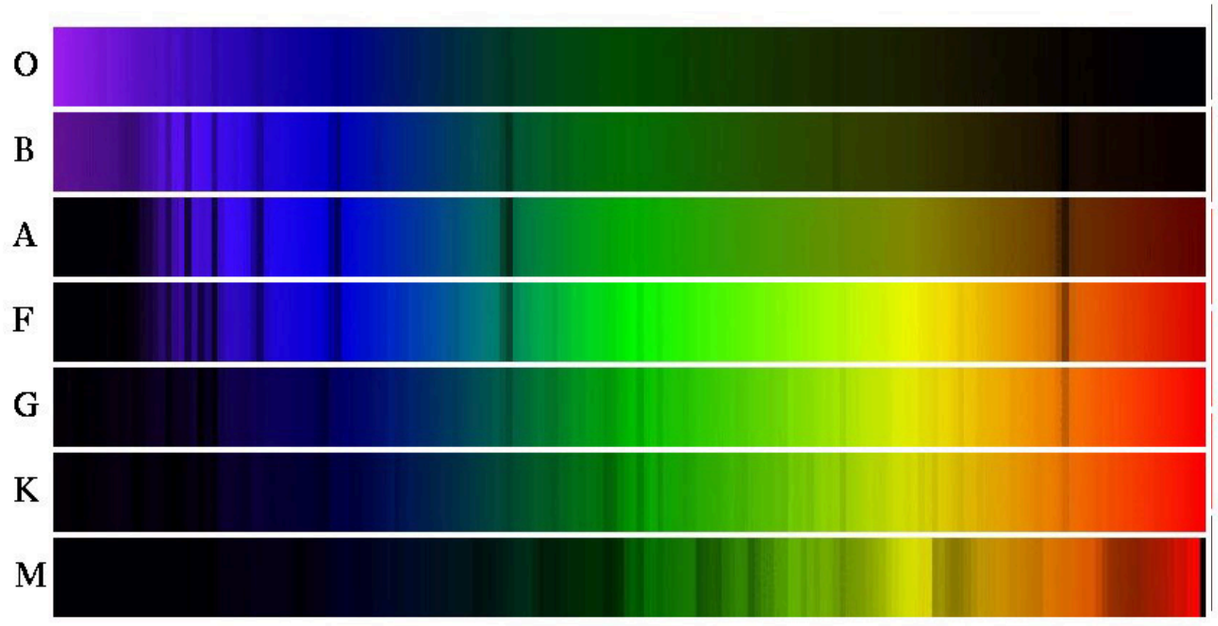




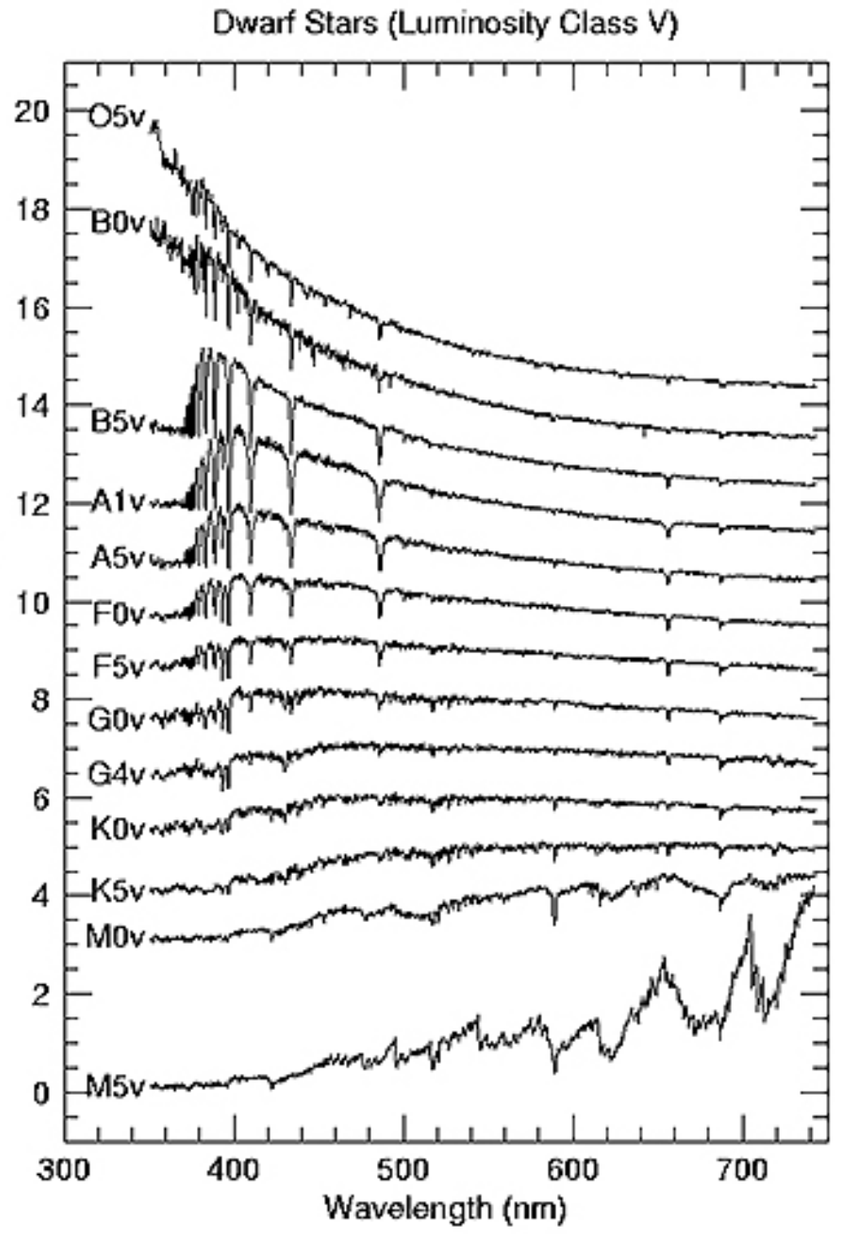
Exemple - Autres étoiles



Soleil



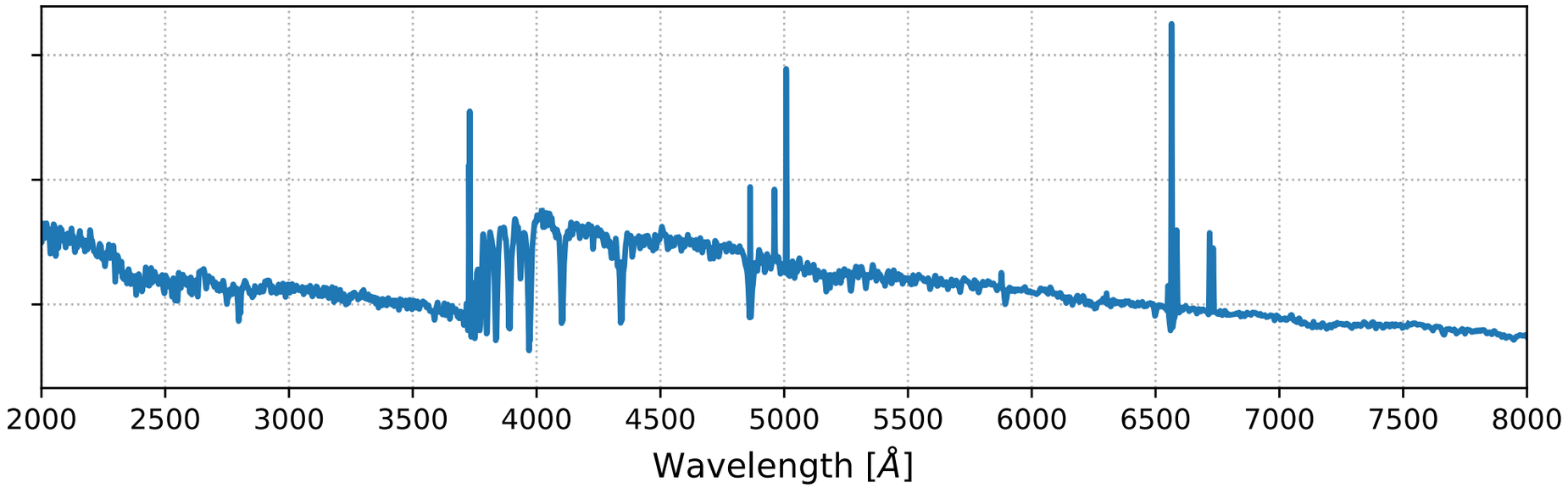
Class	Temperature
O	≥ 30,000 K
B	10,000–30,000 K
A	7,500–10,000 K
F	6,000–7,500 K
G	5,200–6,000 K
K	3,700–5,200 K
M	≤ 3,700 K



Exemple - Autres galaxies

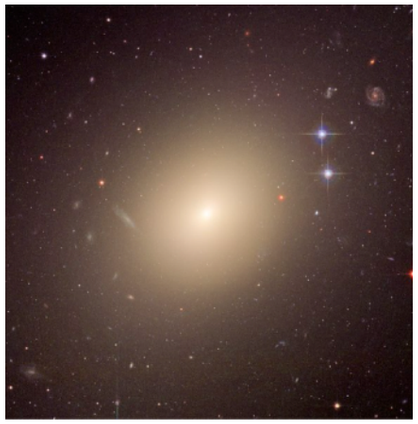
Galaxy Spirale Bleue

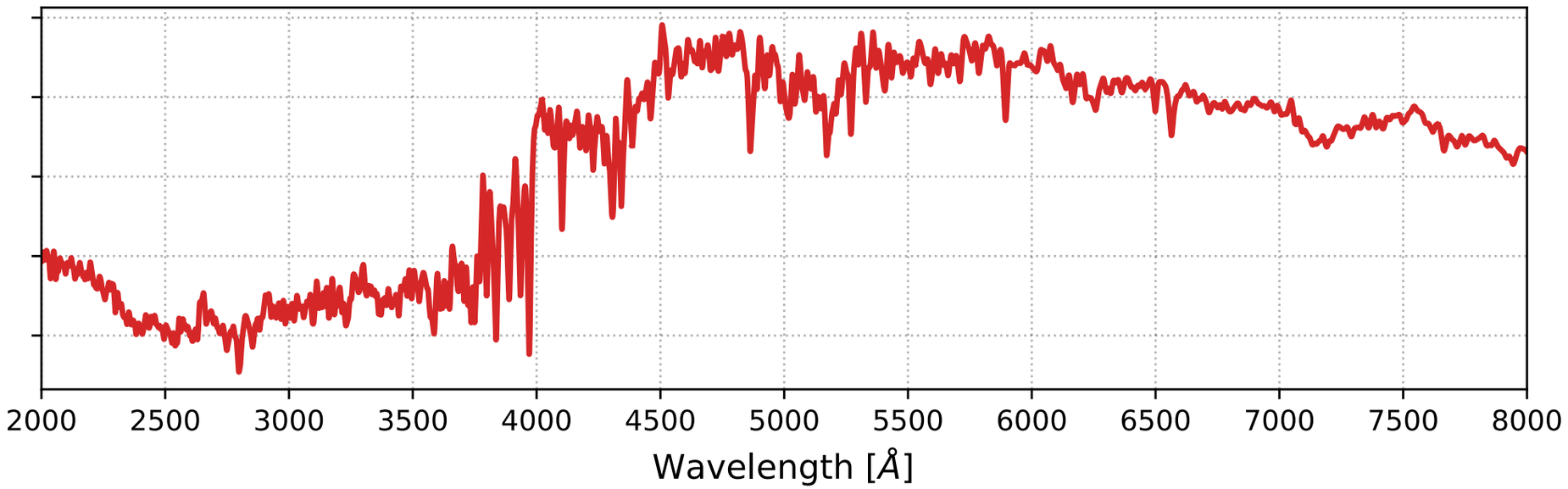
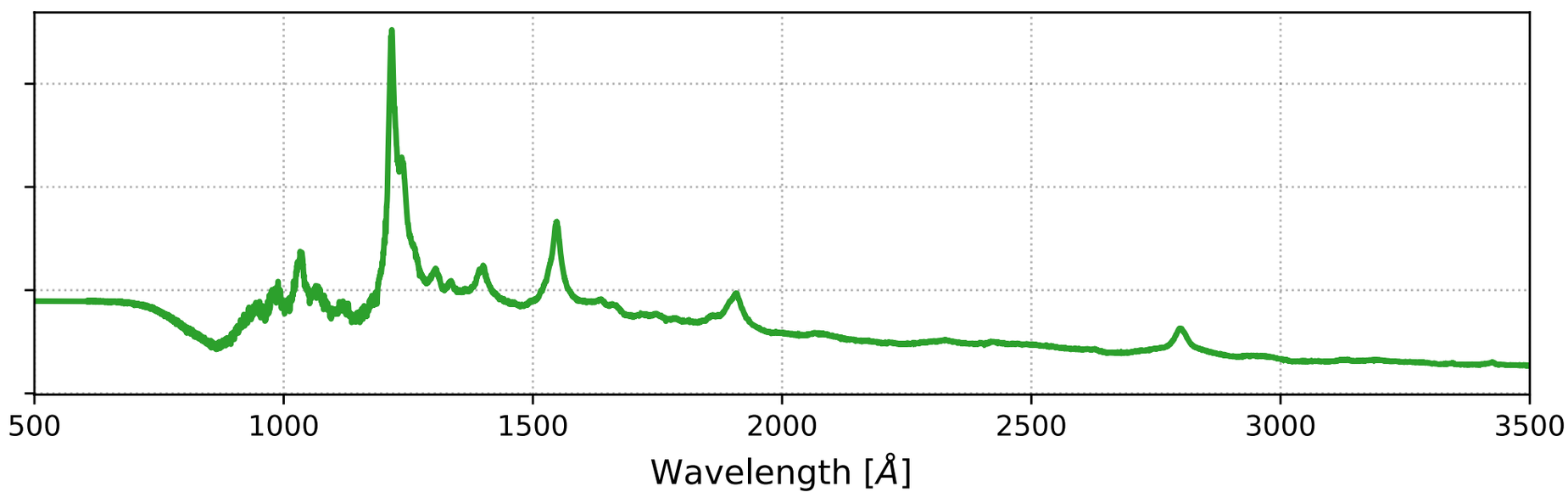
NGC 1232



Galaxie Elliptique Rouge

ESO 325-G004





Quasi-Stellar Object ou Quasar