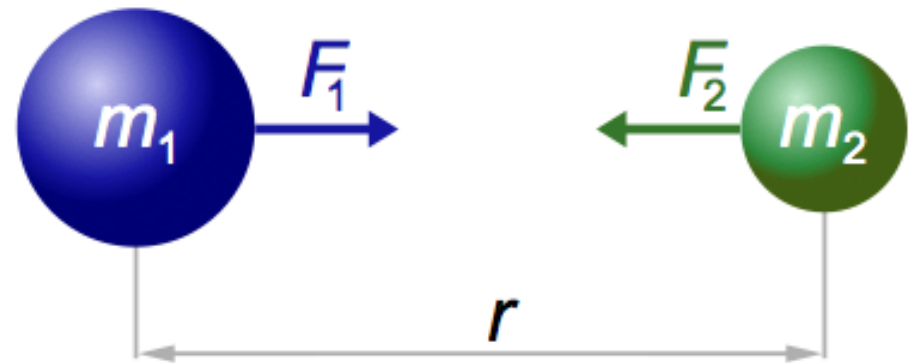


La gravitation aux échelles cosmologiques

- Galaxies et Univers à grande échelle
- Cosmologie
- Matière noire
- Energie noire

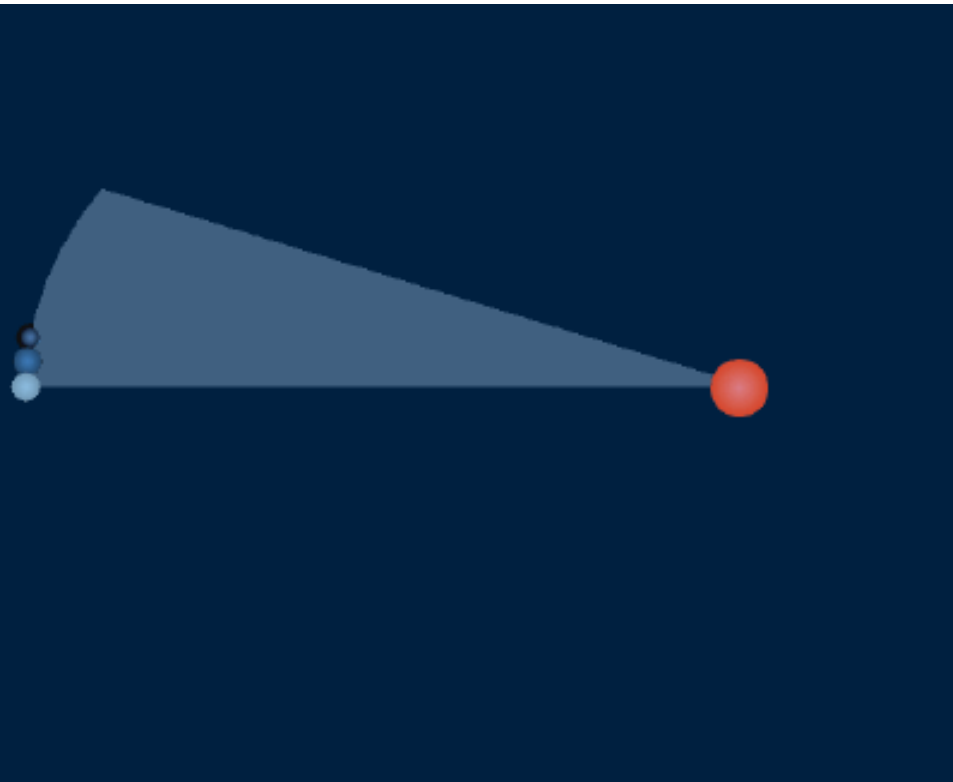
Comment connaître la masse des objets dans l'Univers ?



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

Systeme solaire : mouvement des planètes

- Les planètes suivent des **ellipses** autour du Soleil (lois de Kepler)



- La vitesse d'orbite est maximale au **périhélie** (point le plus proche du soleil)

Systeme solaire

A detailed illustration of the solar system. On the left, the Sun is depicted as a large, glowing orange and red sphere. Eight planets are shown in their respective elliptical orbits around the Sun. From left to right, the planets are: Mercury (small, greyish-brown), Venus (yellowish-brown), Earth (blue and white), Mars (reddish-brown), Jupiter (large, orange and white striped), Saturn (yellowish with prominent rings), Uranus (light blue), and Neptune (dark blue). The background is a dark blue space with some nebulae and a comet streaking across the bottom left.

- Mercure: période 88 jours
- Terre : période 365 jours
- Neptune : période 59800 jours

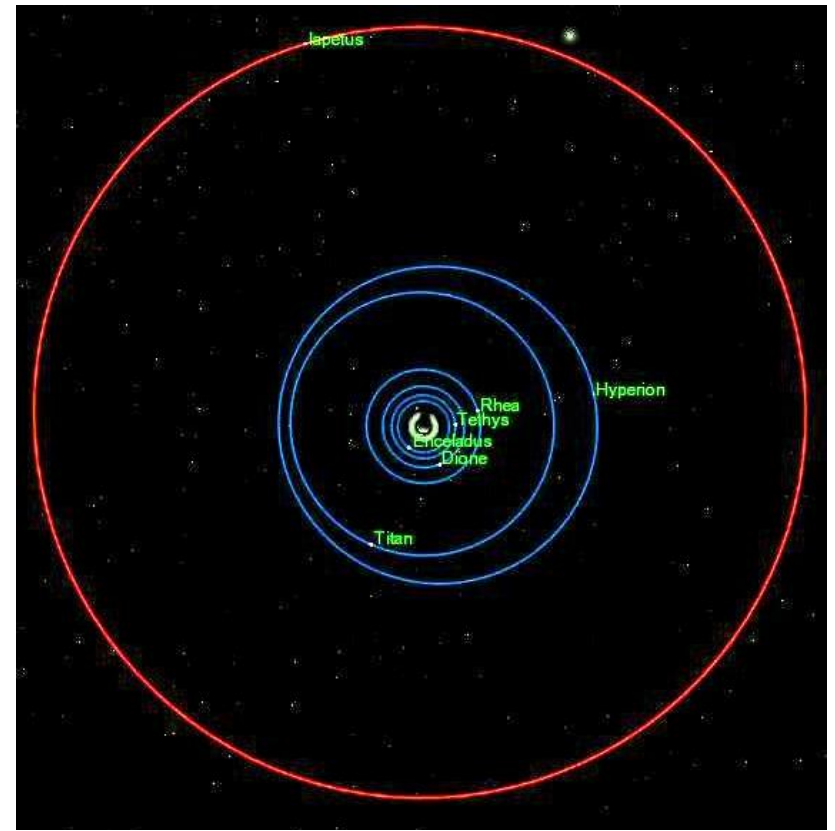
vitesse moyenne: 170 000 km/h
vitesse moyenne: 107 000 km/h
vitesse moyenne: 19 400 km/h

Systemes de satellites

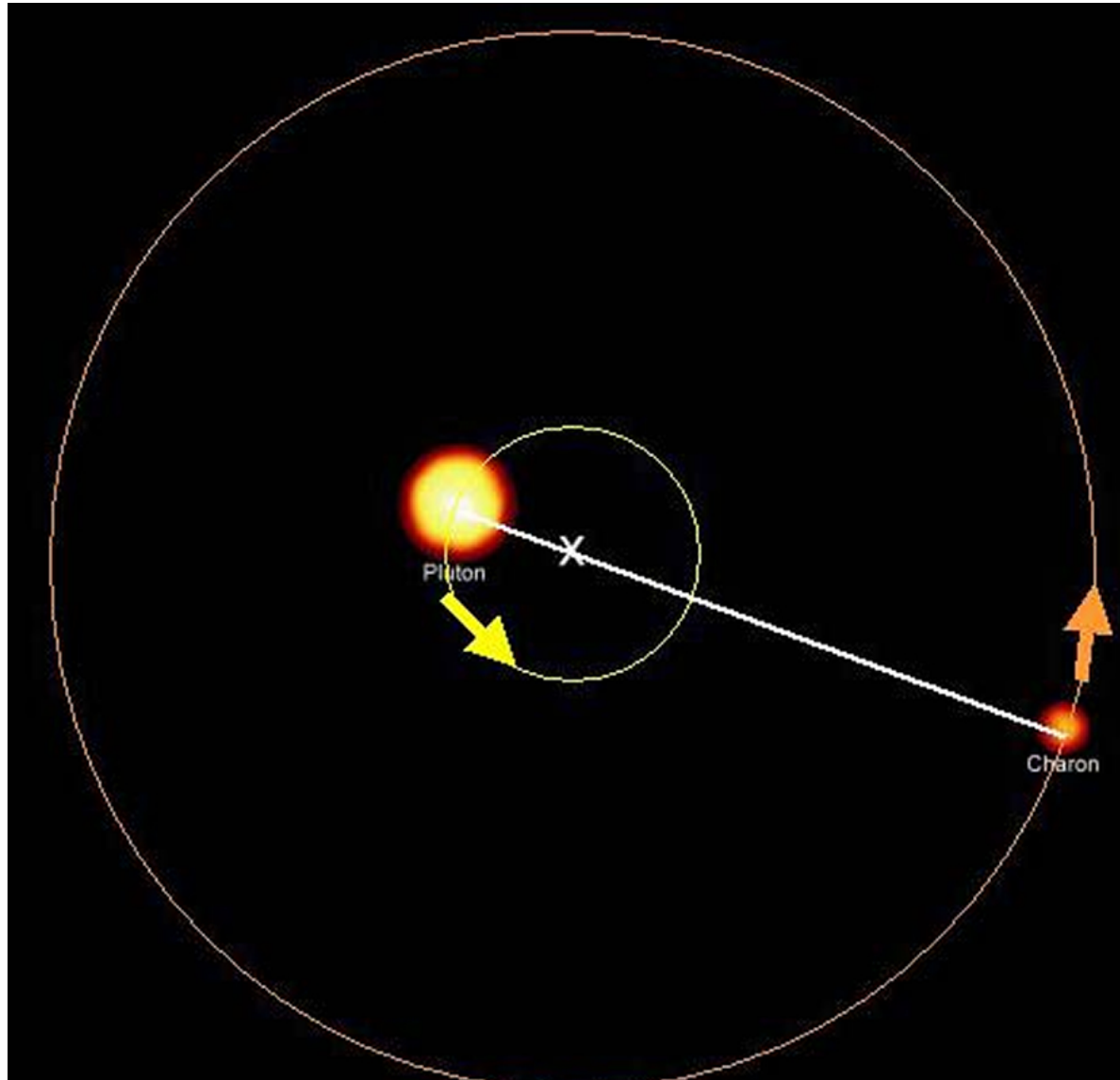
Jupiter



Saturne



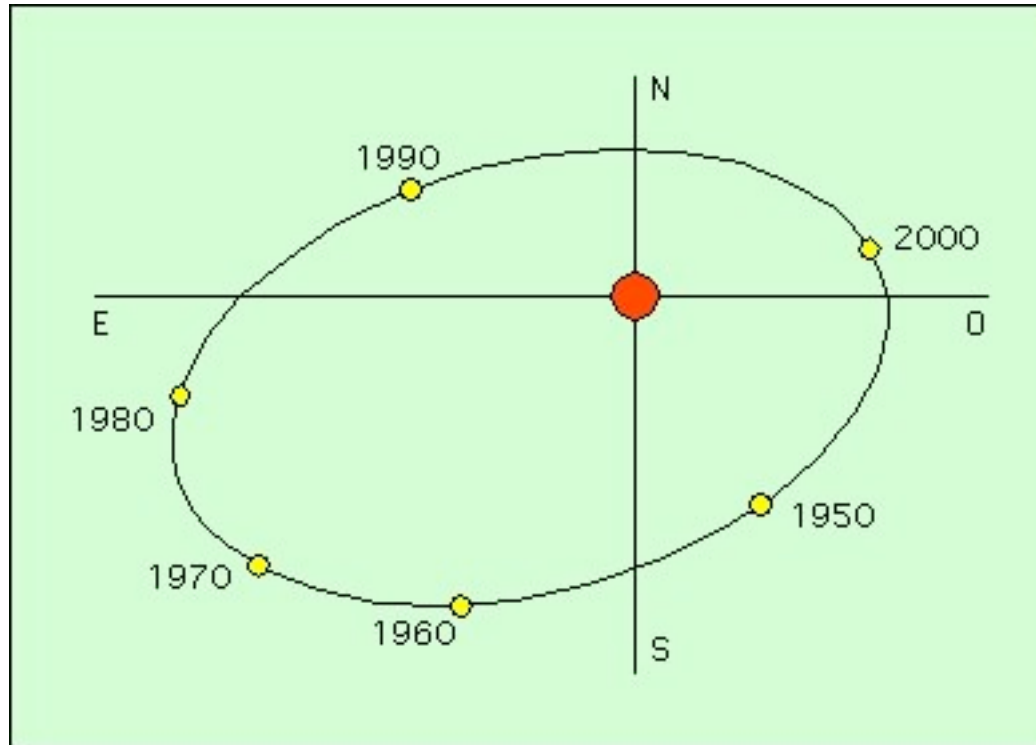
Pluton et Charon



Pluton et Charon tournent toutes les deux autour de leur Barycentre ou Centre de gravité

Le barycentre Terre-Lune se trouve à 4600 km du centre de la Terre.

Etoiles doubles / multiples



Par application des lois de Kepler: mesure de la masse des deux étoiles.

XIX^{ème} siècle: mesures d'astrométrie (Bessel, Struve)

Galaxies: généralités

- Une galaxie est une galaxie d'étoiles.
- Notre galaxie, la voie lactée, contient environ 100 milliards d'étoiles
- Outre les étoiles, une galaxie contient du gaz (essentiellement de l'hydrogène atomique et moléculaire) et des poussières



On January 5th, 2015 the NASA/ESA Hubble Space Telescope released the biggest image ever taken of the Andromeda Galaxy ...

Galaxie du tourbillon



La Voie Lactée



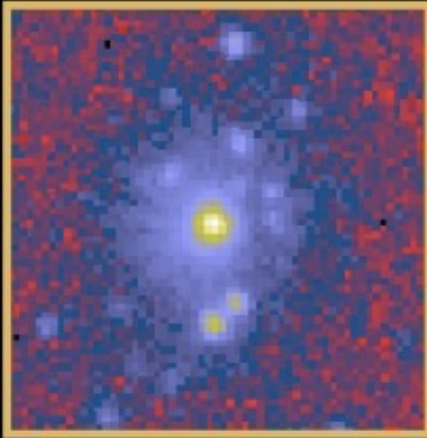
X

UV

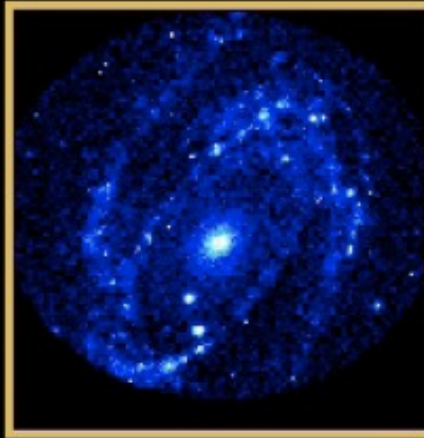


IR

Radio



X-Ray: ROSAT



Ultraviolet: ASTRO-1



Visible: DSS



Visible: R. Gendler



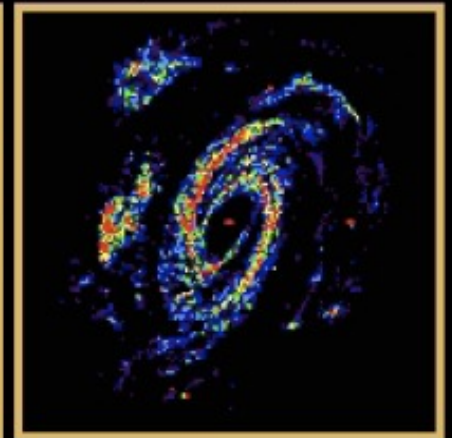
Near-Infrared: Spitzer



Mid-Infrared: Spitzer

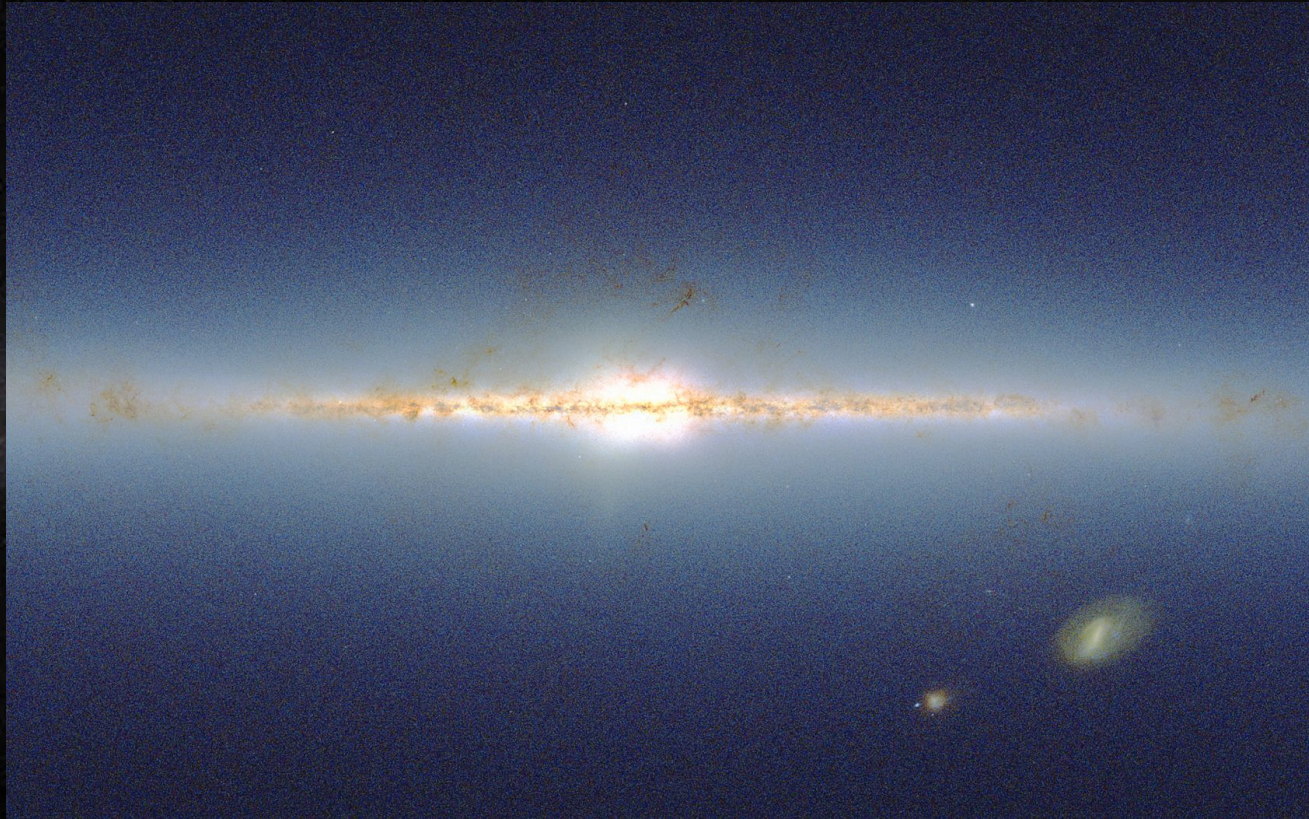


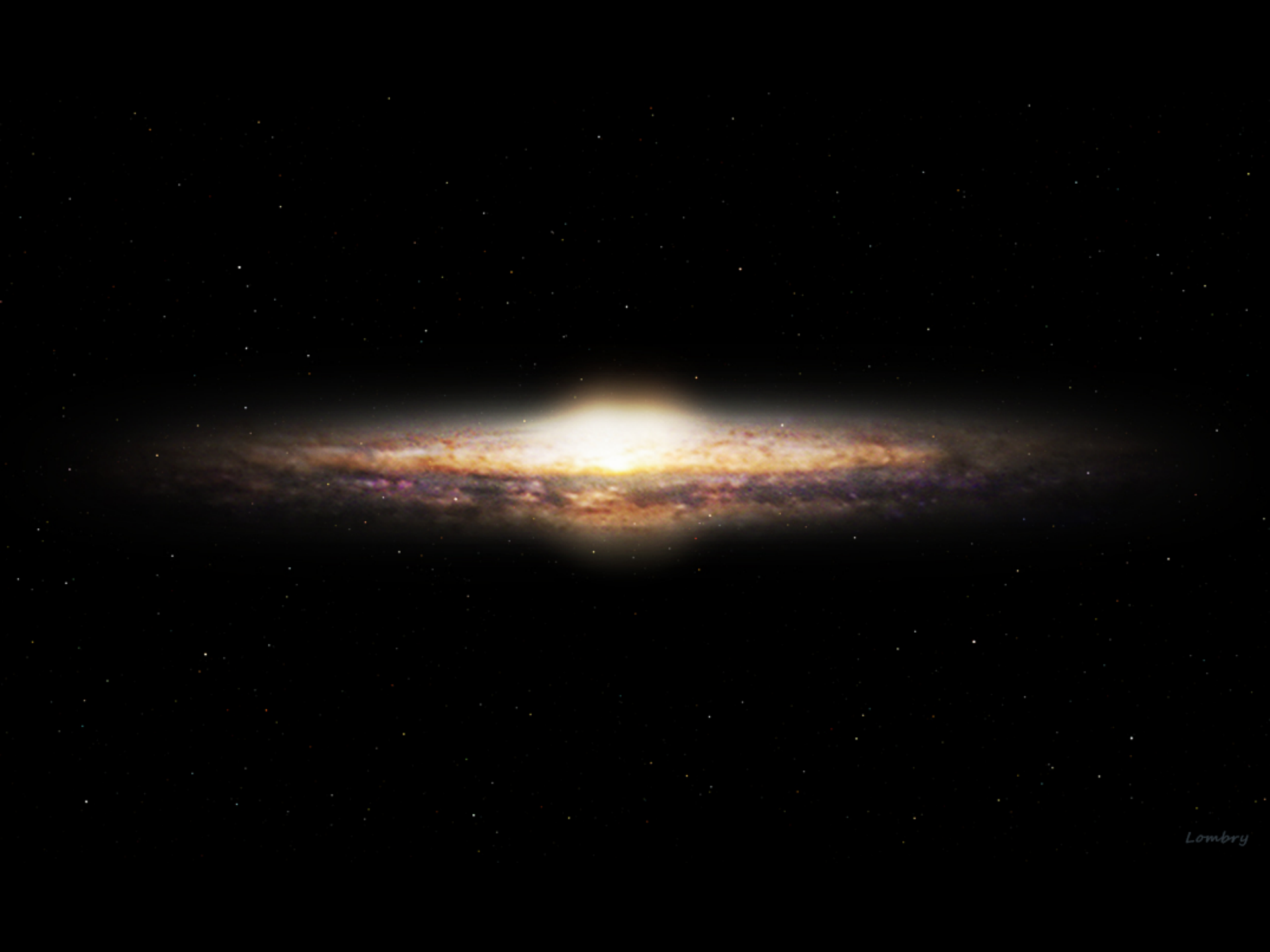
Far-Infrared: Spitzer



Radio: VLA

Vue en infrarouge





Lombry

La Voie Lactée

~100.000 Années-Lumière

Bras de Persée

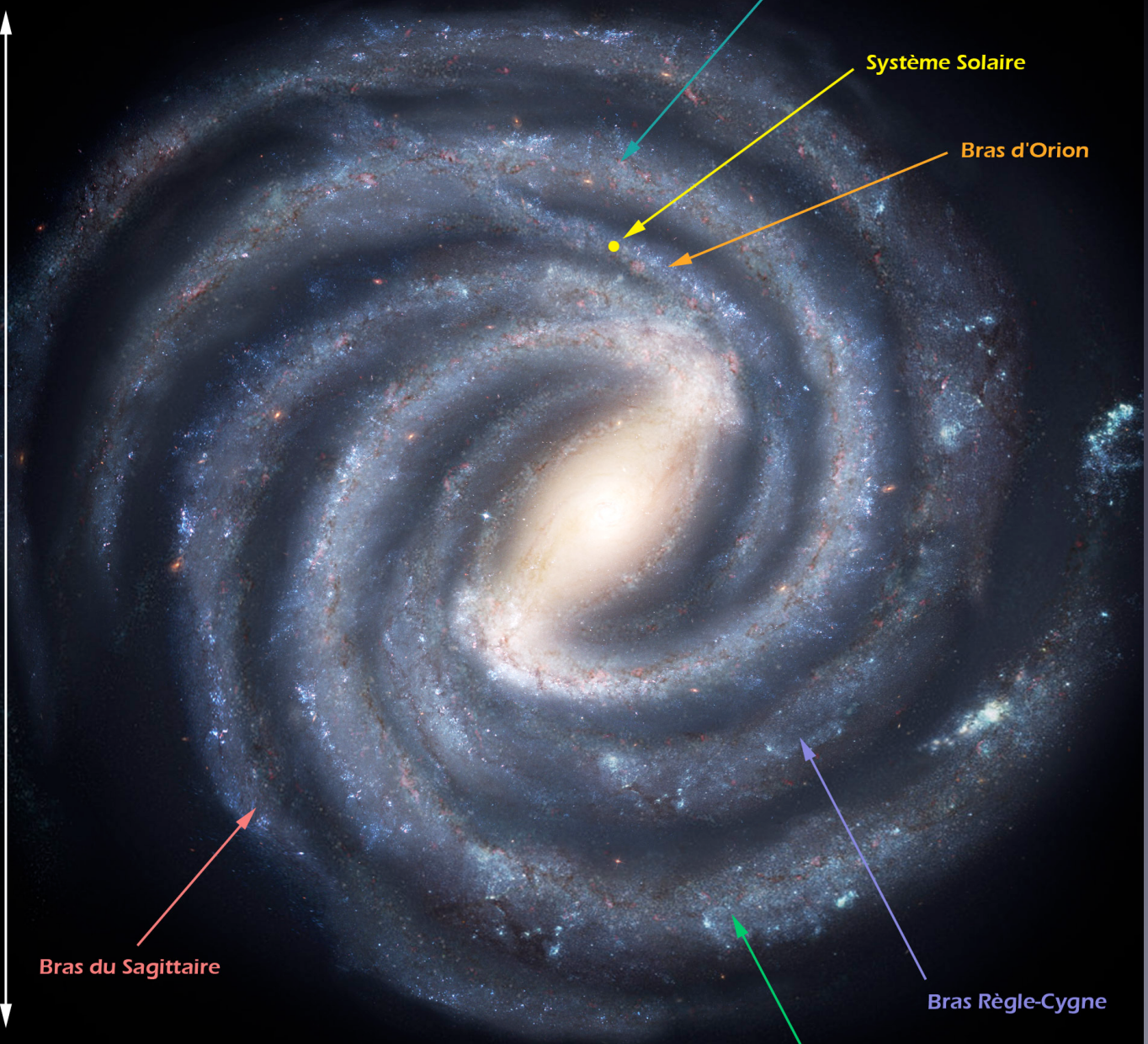
Système Solaire

Bras d'Orion

Bras du Sagittaire

Bras Règle-Cygne

Bras du Centaure



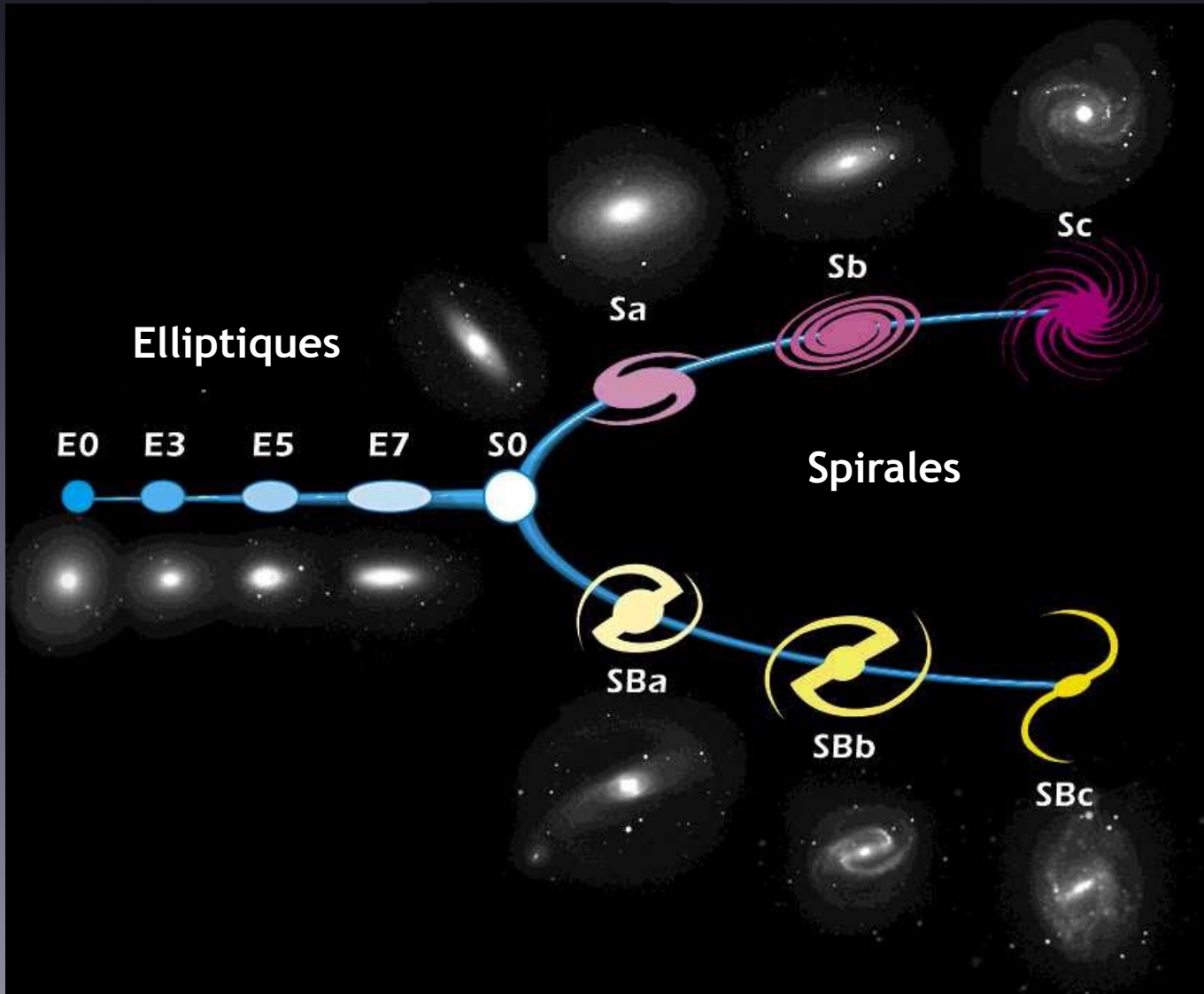
Nébuleuses et amas d'étoiles, nuages sombres



Centre galactique



Différents types de galaxies





Galaxies en interaction



Galaxies en interaction



Amas de galaxies



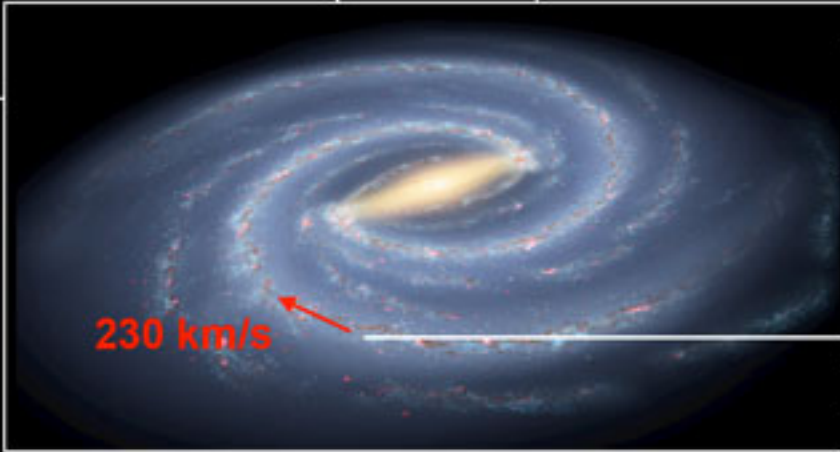
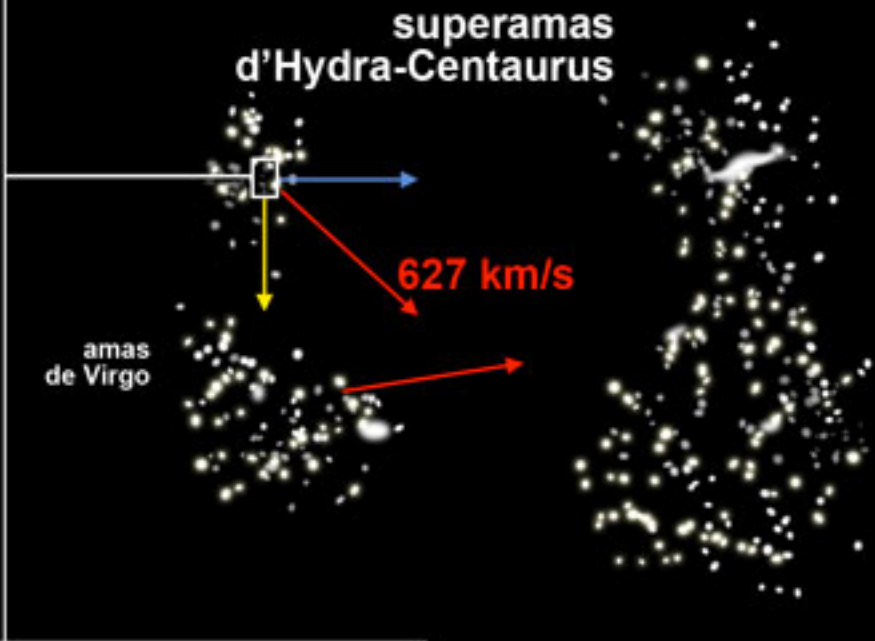
Structure générale de l'Univers



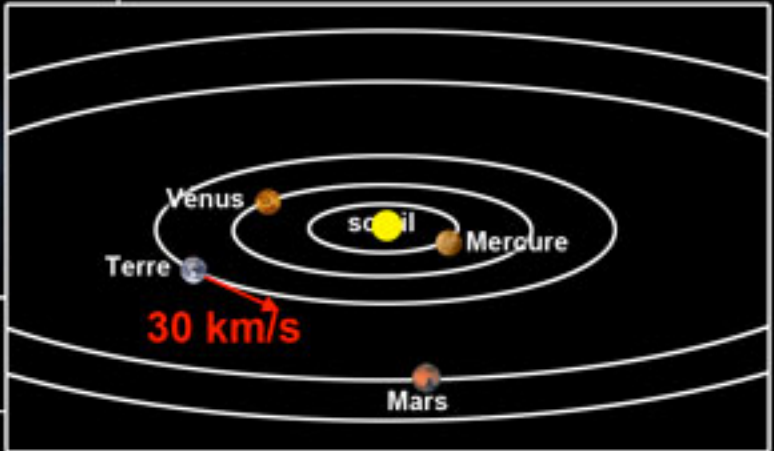
Le Groupe local



superamas d'Hydra-Centaurus



La Galaxie



Le système solaire

Structure générale de l'Univers

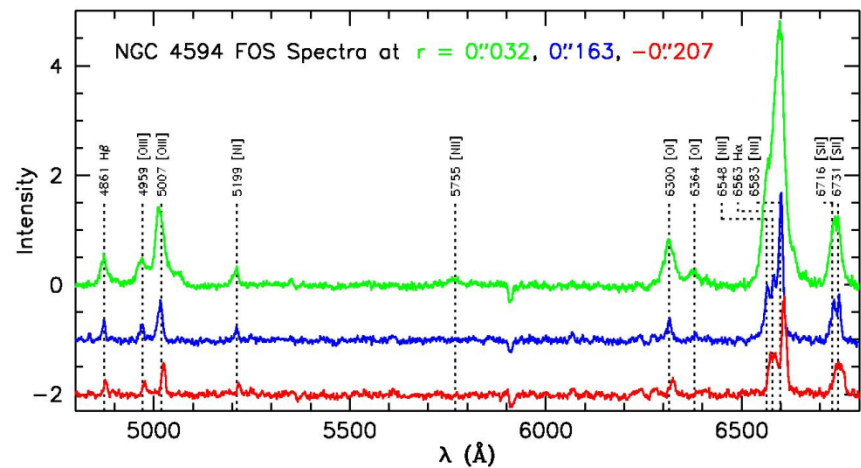
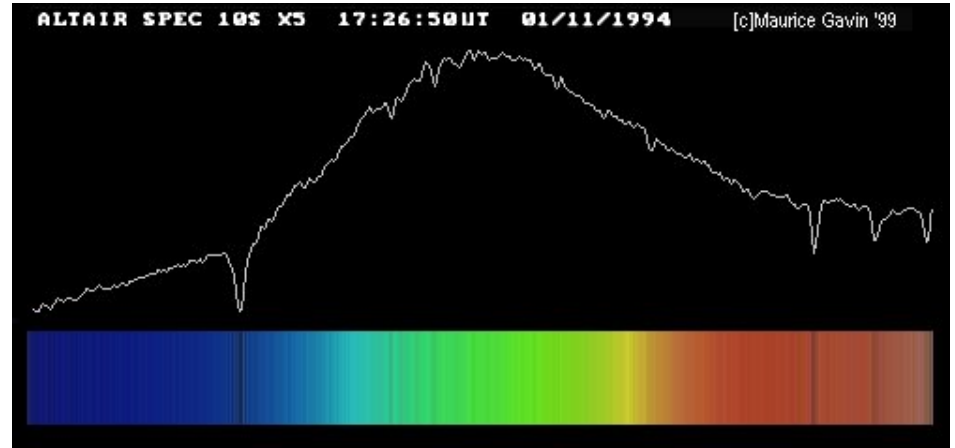
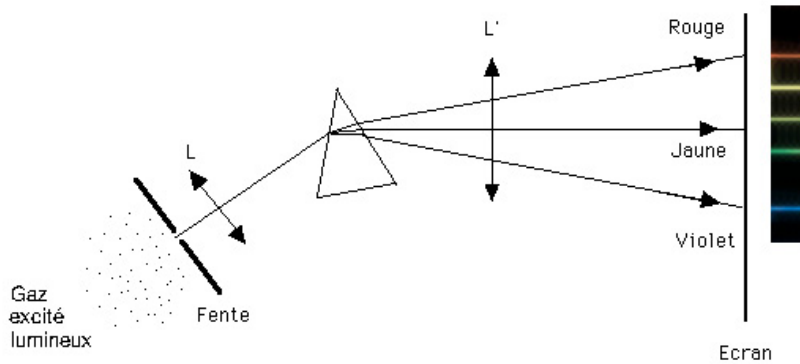
A visualization of the cosmic web, showing a complex network of blue filaments and red nodes against a black background. The filaments represent the large-scale structure of the universe, while the red nodes represent galaxy clusters and individual galaxies.

Changement d'échelle!

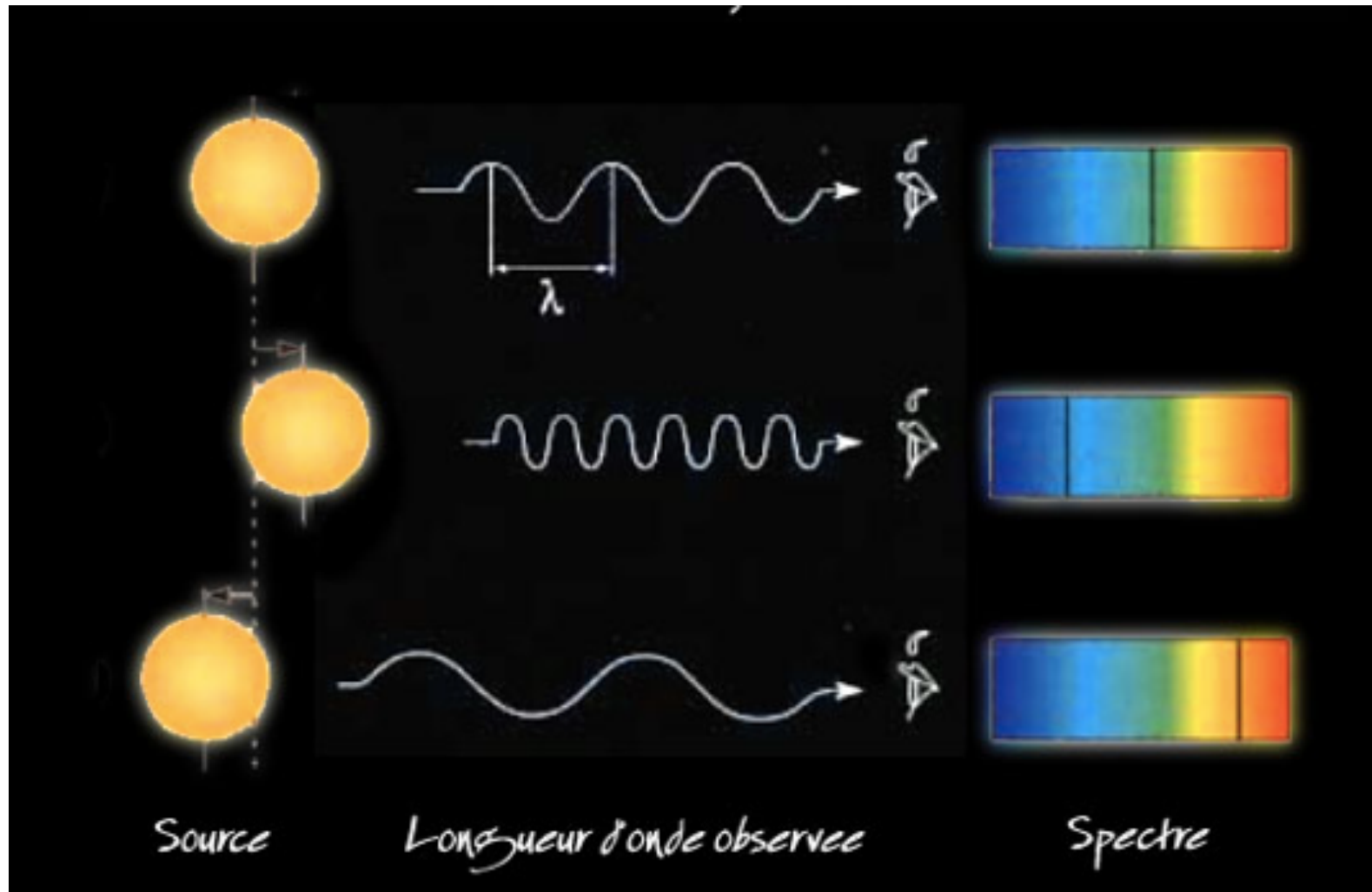
- Debut du XXeme siècle, la mesure des distances des galaxies
- 1920: le 'Grand débat' entre H. Shapley et H. Curtis

=> Etude des mouvements des galaxies jusqu'à des millions d'années-lumière.

Spectroscopie



Effet Doppler et vitesse des galaxies



1929, Edwin Hubble



L'Univers en expansion

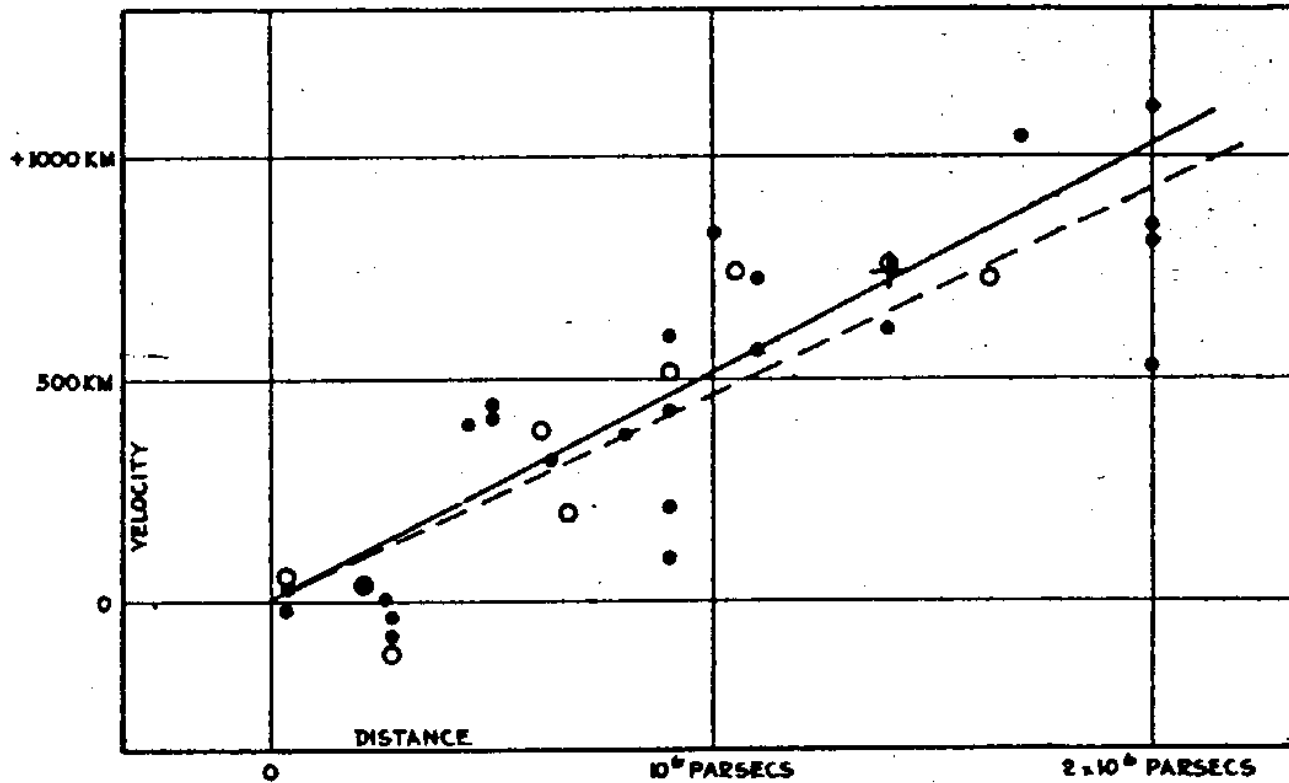
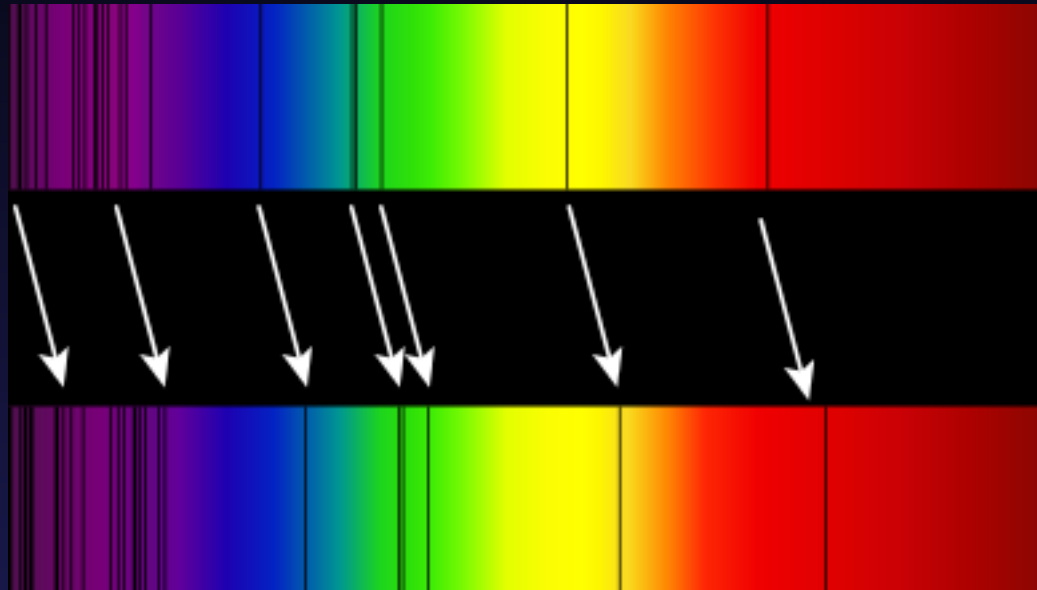
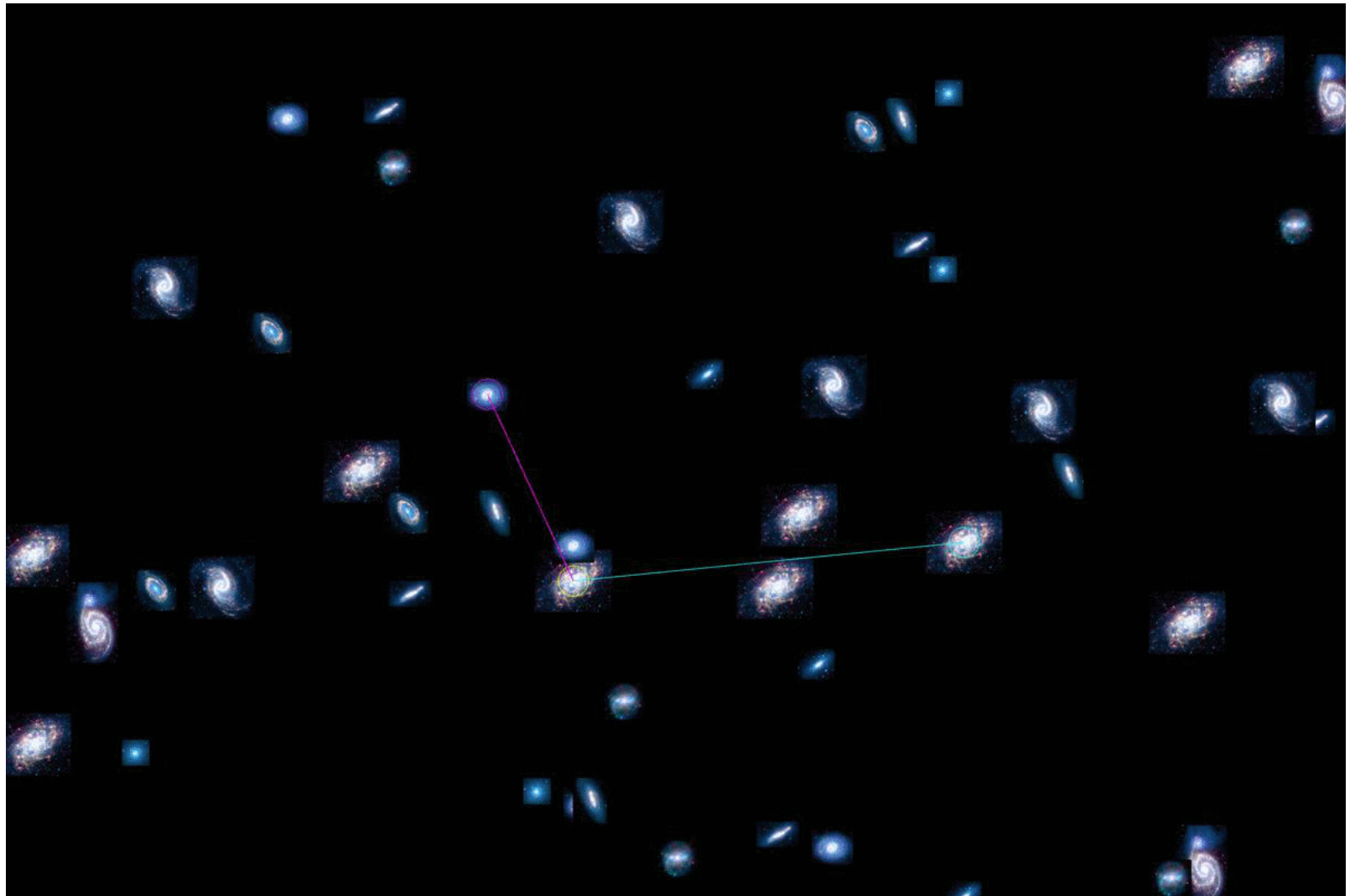


FIGURE 1

Signature dans la lumière



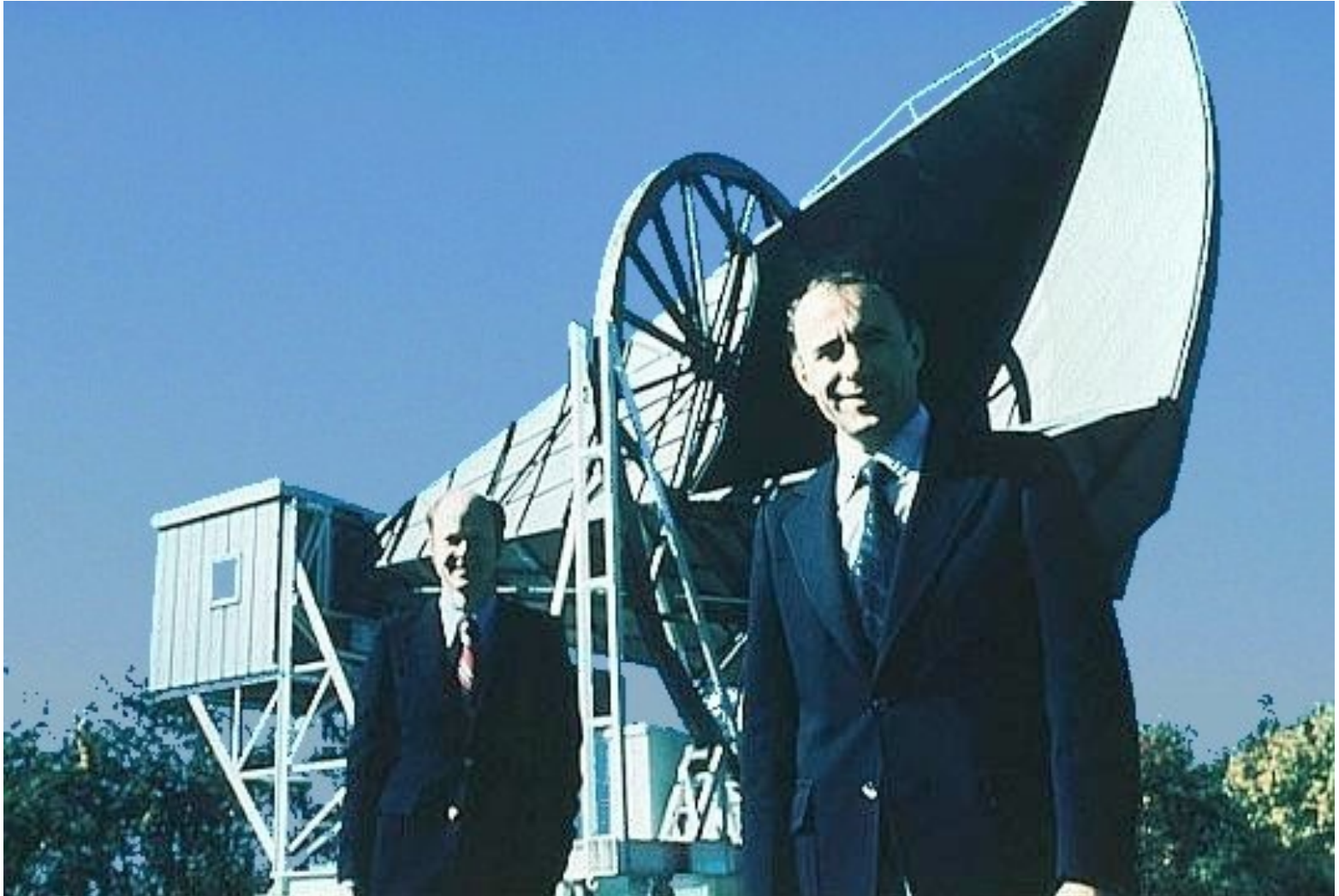
Edwin Hubble (1929):
La lumière des galaxies distantes semble
systématiquement décalée vers le rouge

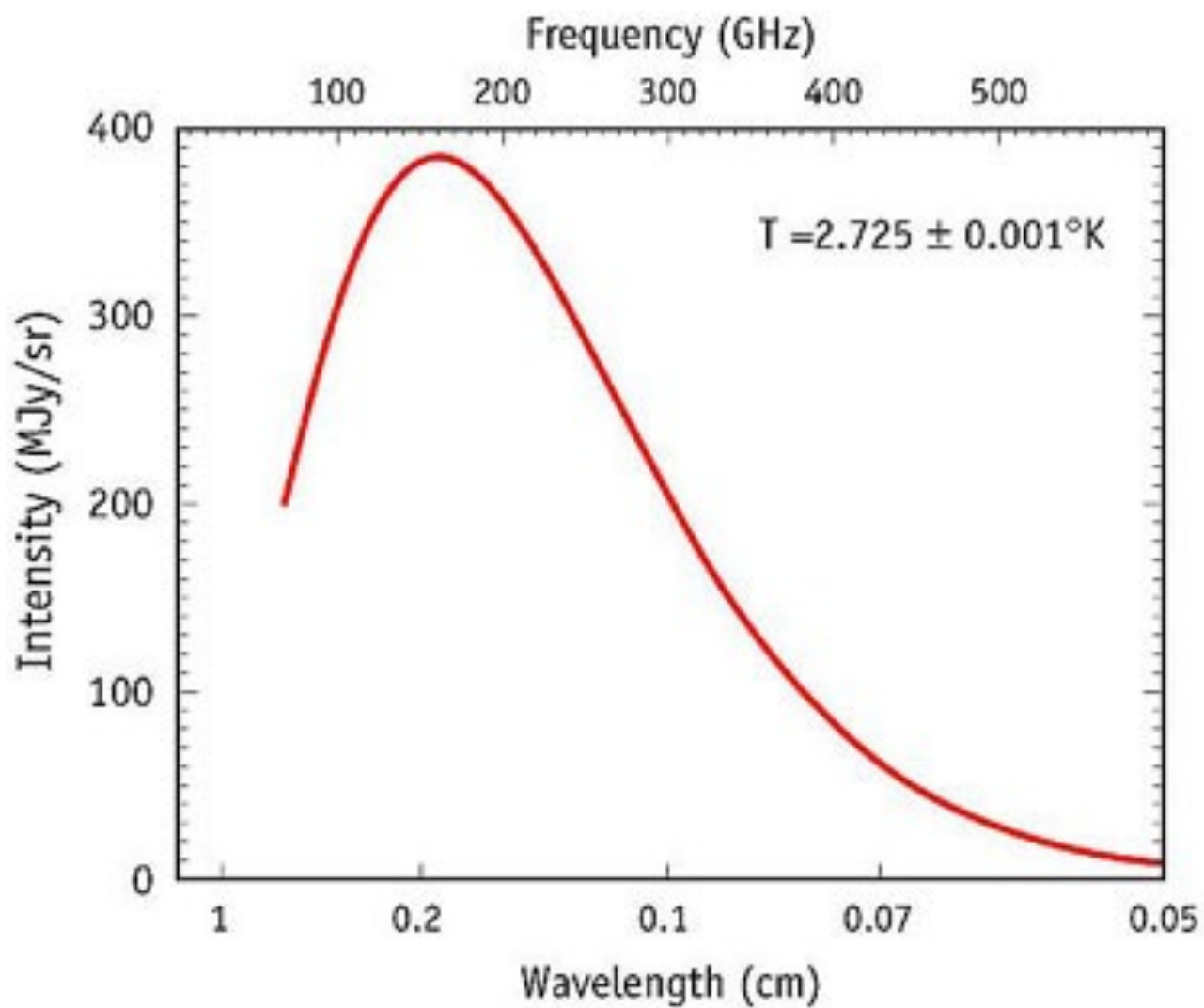


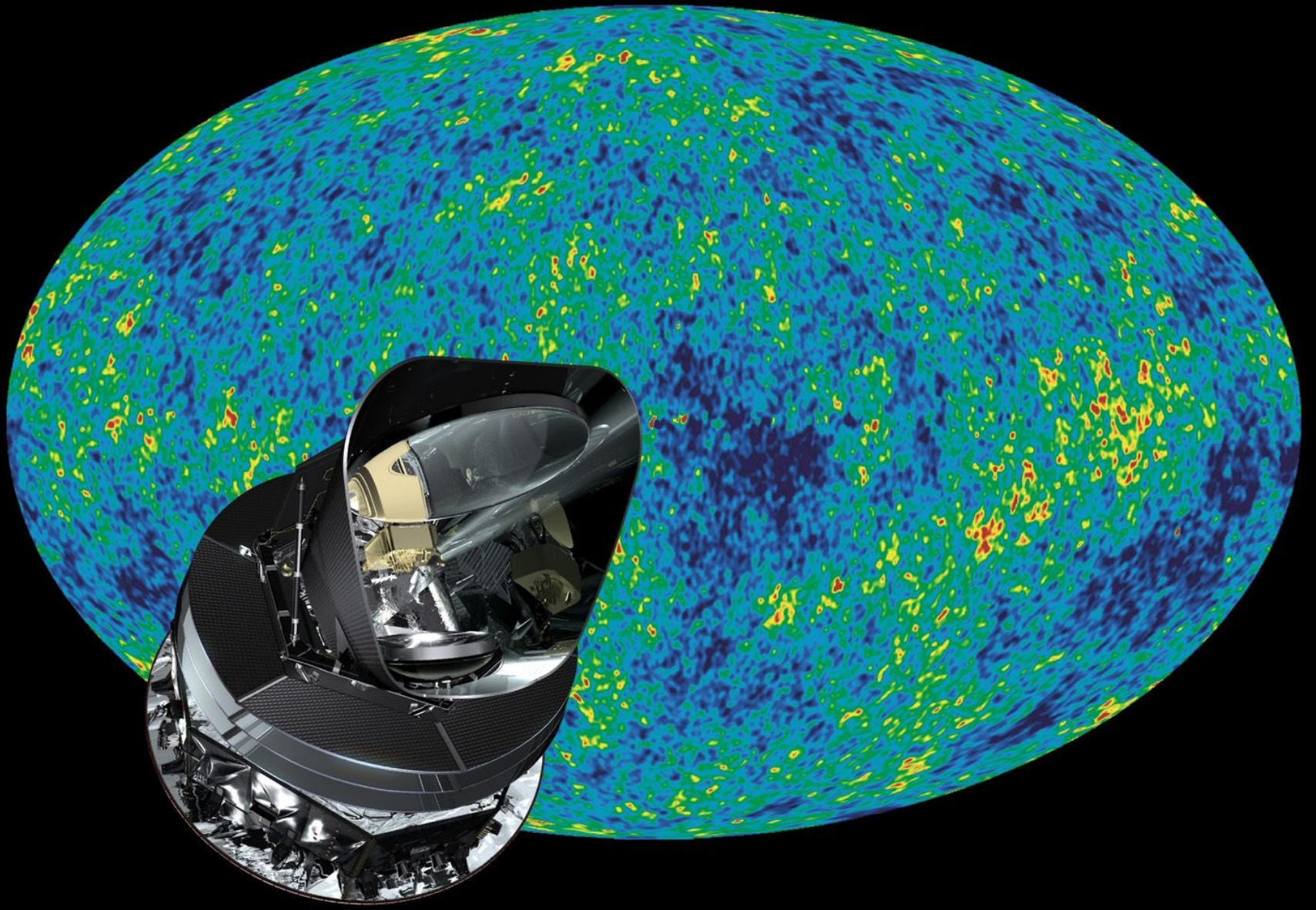
Les débuts de l'Univers

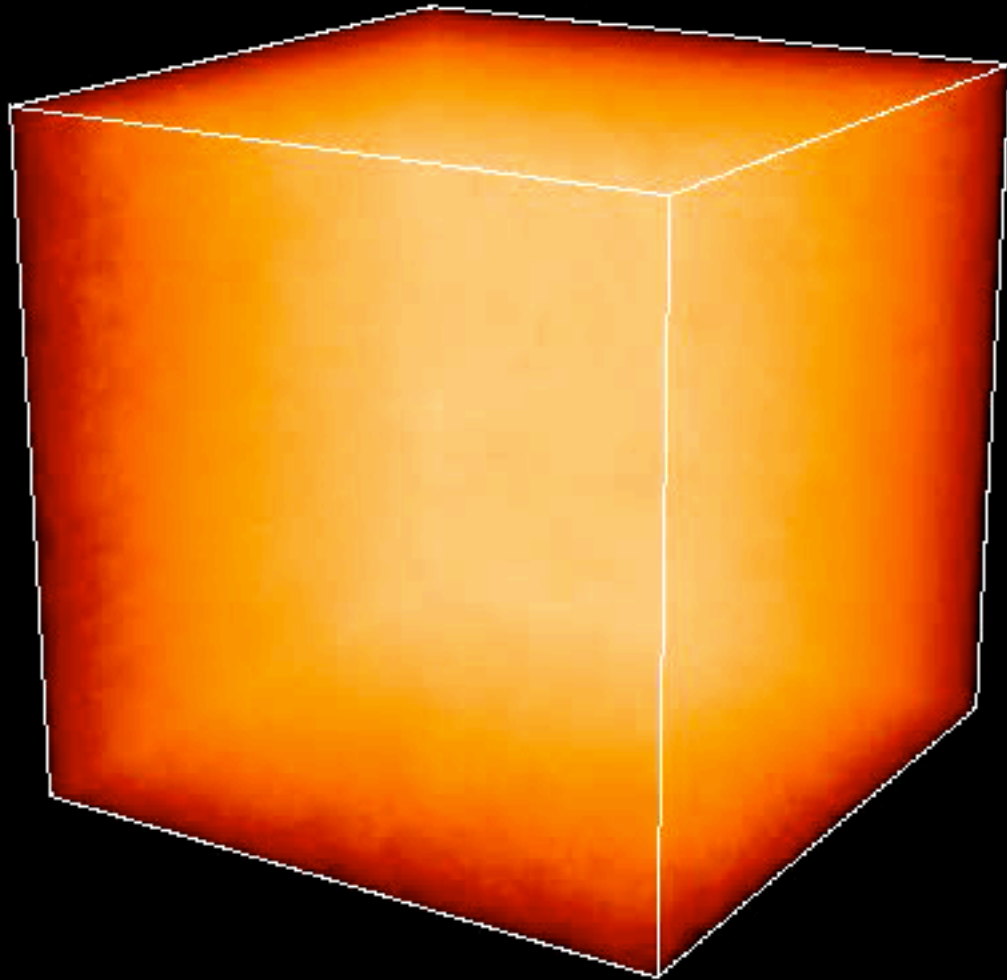
- L'Univers était très dense, très chaud
- La lumière était dominante mais prisonnière de la matière (essentiellement composée de protons, électrons, et noyaux d'hélium)
- Vers + 380 000 ans, l'Univers se refroidit autour de 3500 degrés, les électrons se combinent brutalement aux noyaux, la lumière peut s'échapper!

Penzias et Wilson (1965)

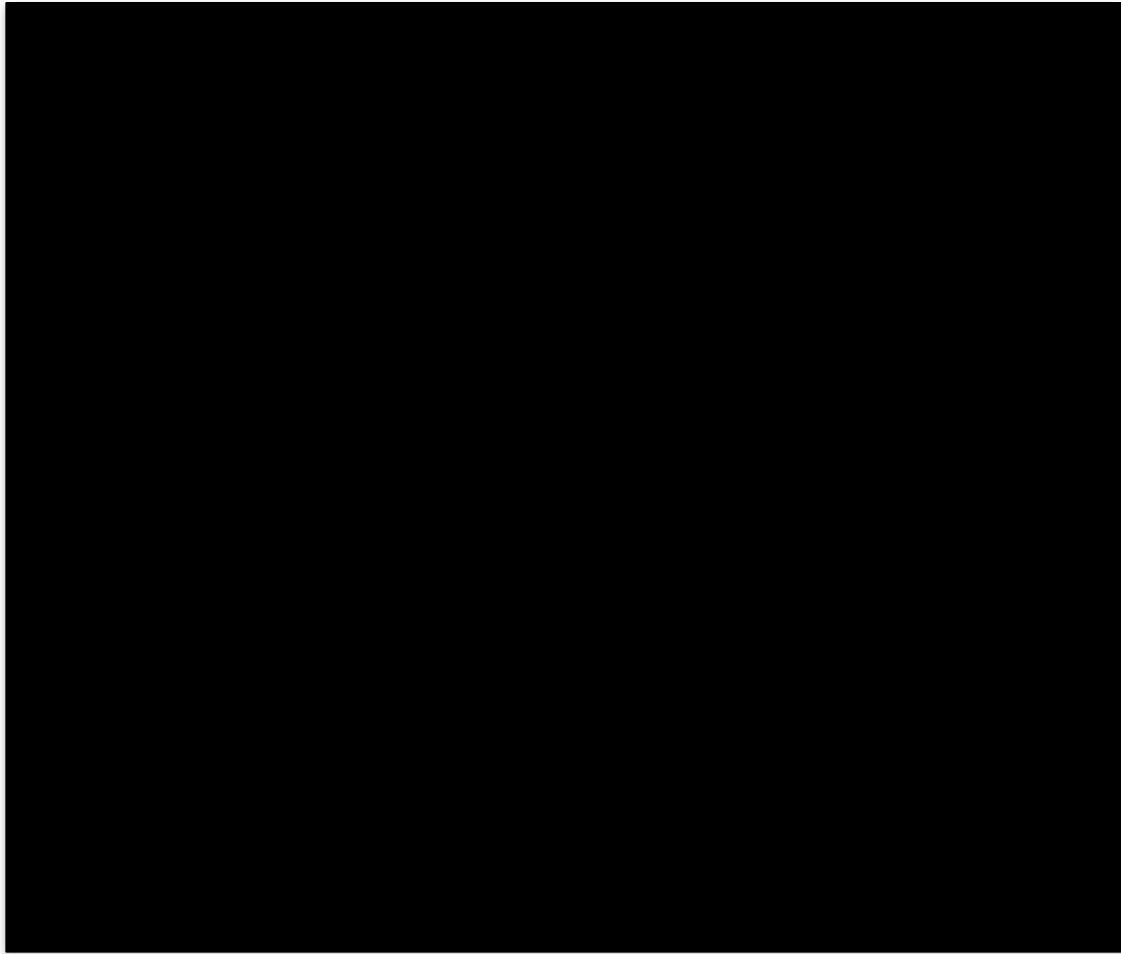




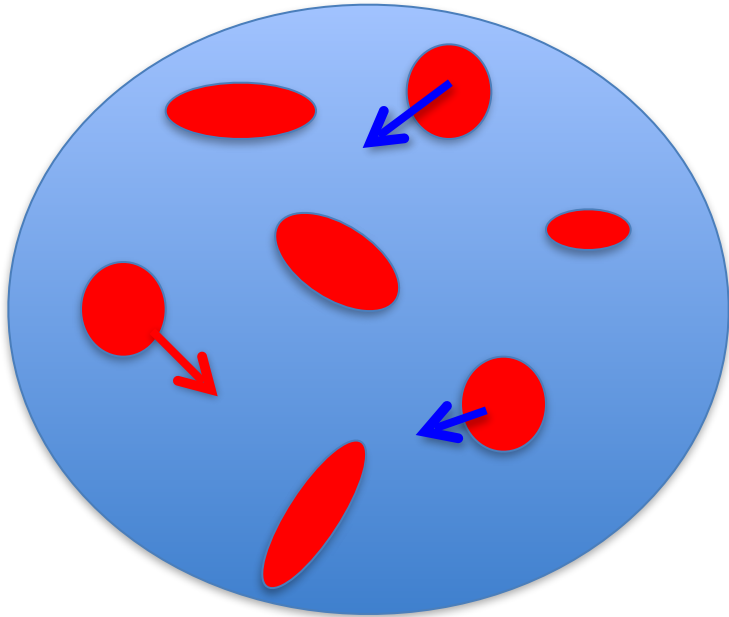




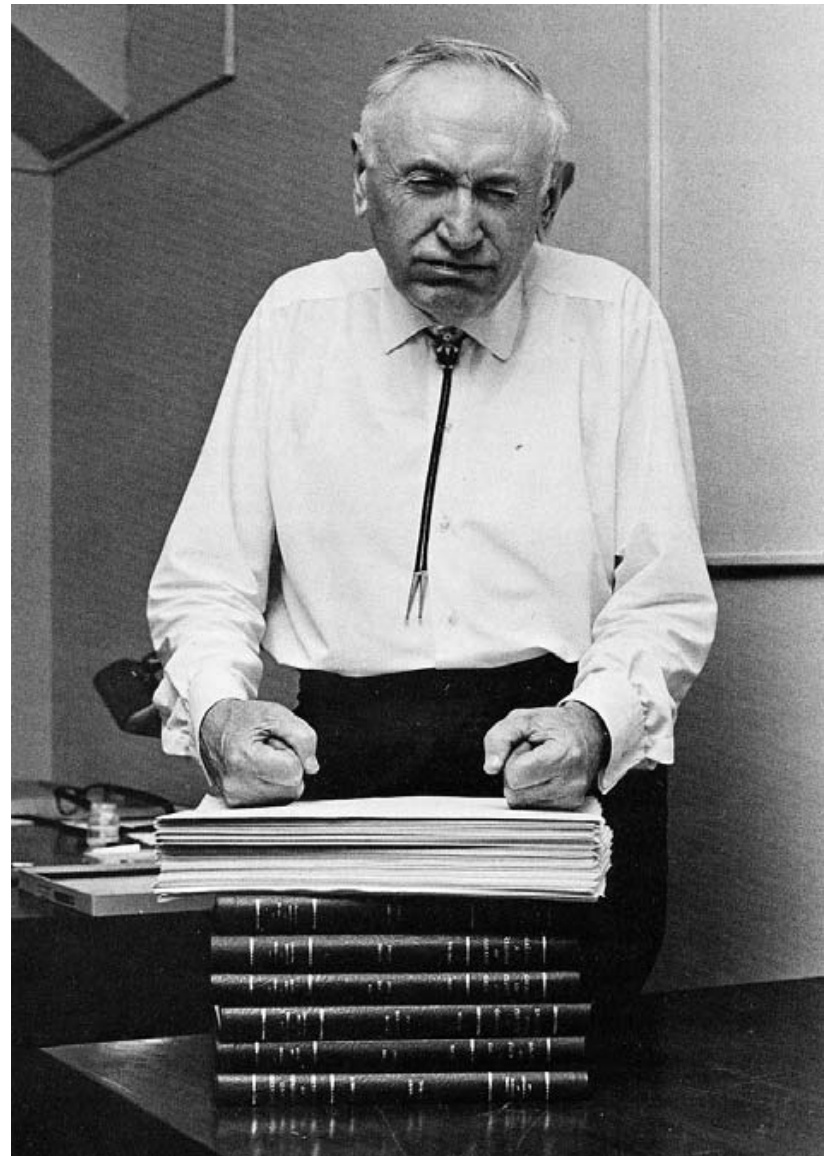
Matière Noire



Fritz Zwicky (1933)



‘agitation’ du système
=
Energie gravitationnelle
(liée à la masse totale)

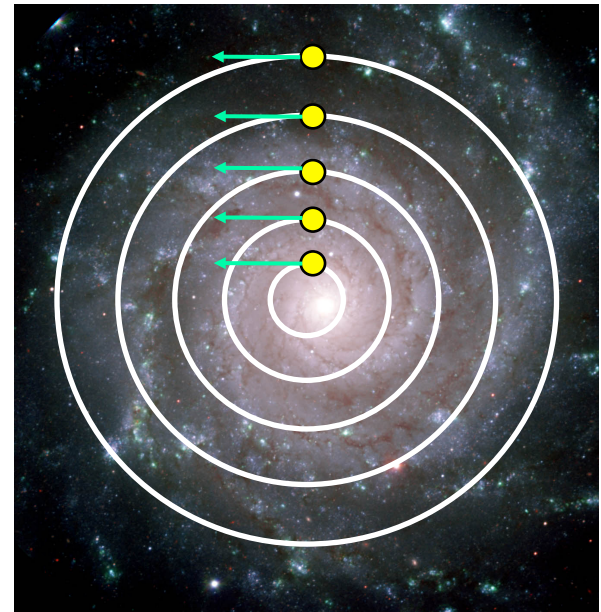


La masse totale de l’amas de galaxies de Coma est
100 à 500 x supérieure à la somme des masses de ses galaxies

Galaxie spirale: exemple d'Andromède



Vera Rubin (1970): des vitesses à problème....



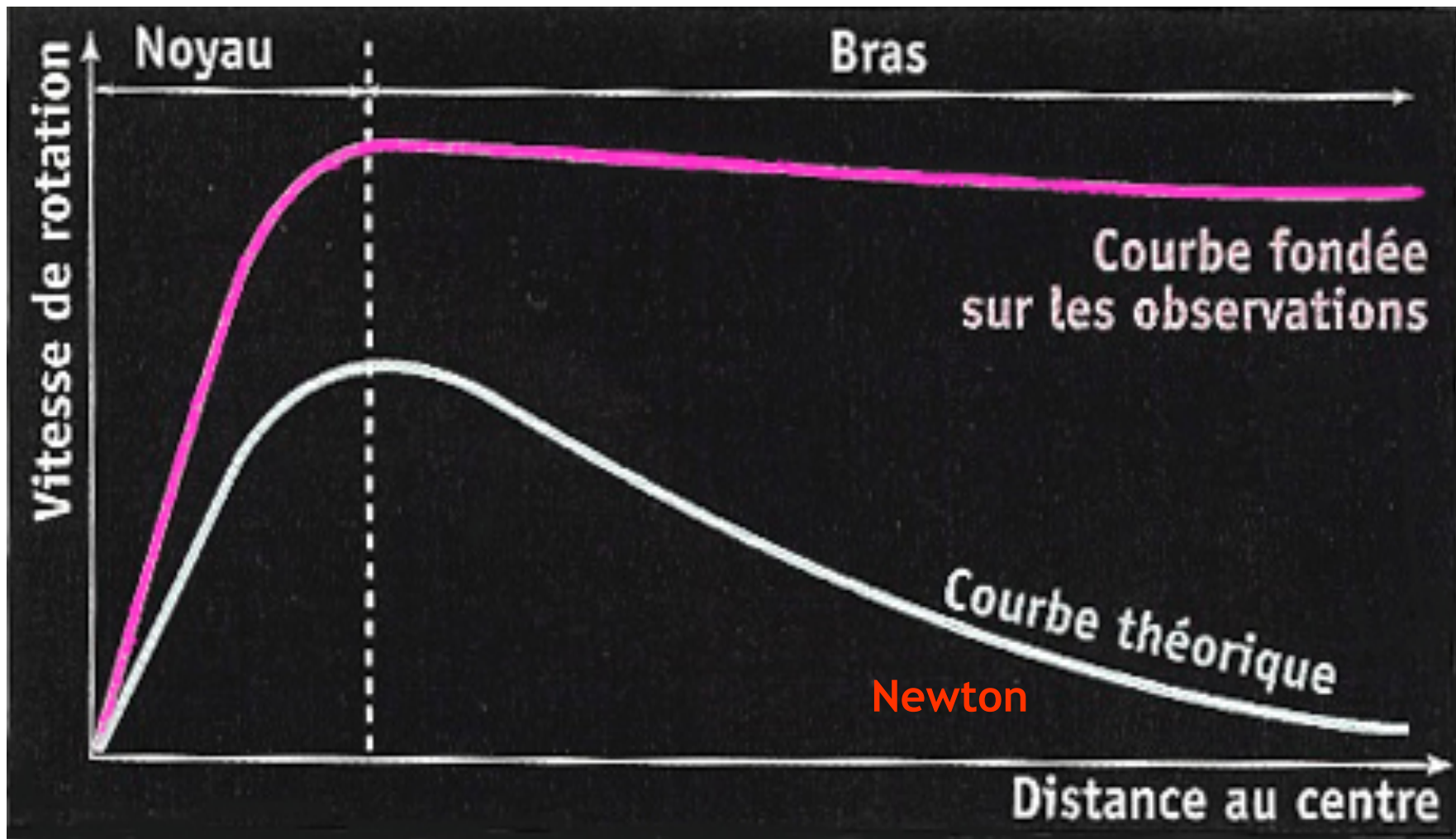
Observations :

Les vitesses sont
constantes

Vera Rubin 1970

Des vitesses à problème

- Etude de la **vitesse de rotation** des étoiles au sein des **galaxies spirales**
 - La vitesse devrait diminuer à mesure que la distance au noyau galactique augmente
 - Les prédictions de vitesse sont calculées à partir de la masse des objets visibles (Newton et Kepler)
 - Au contraire la vitesse dans les bras spiraux est quasi constante.
- Problème similaire à celui relevé par Fritz Zwicky en 1933



$$V = \sqrt{G.M / R}$$

Supposition : matière noire

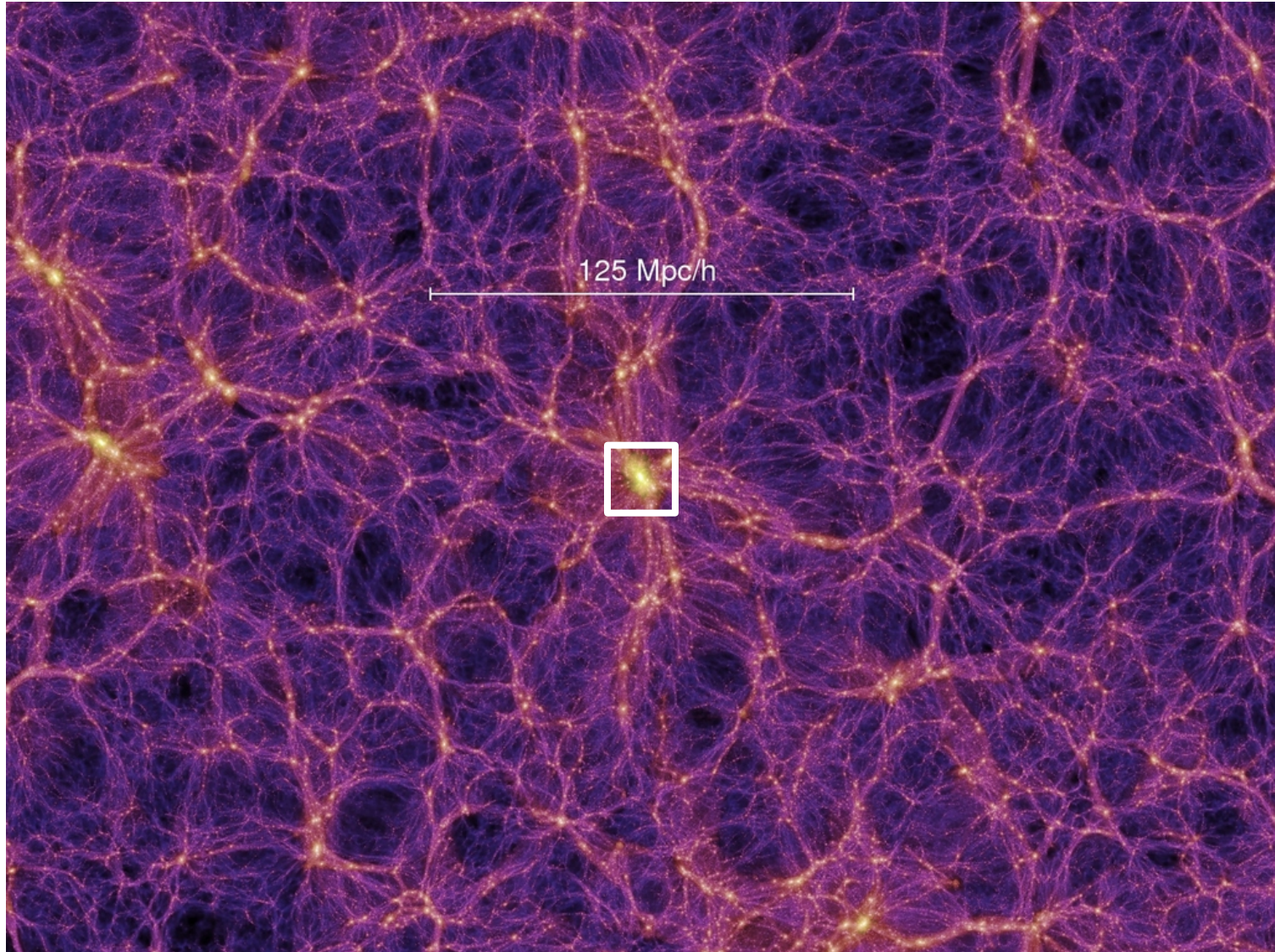
- Pour expliquer cette dynamique, on suppose la présence d'un halo de **matière noire** autour des galaxies spirales dont la masse serait 5 à 10 fois plus importante que celle des galaxies.
- **90% de la matière de l'Univers** serait composé de cette matière noire, invisible par nos instruments dont la nature reste encore inconnue.
- L'étude sur plus de 200 autres galaxies confirme ces résultats.

Balances cosmiques

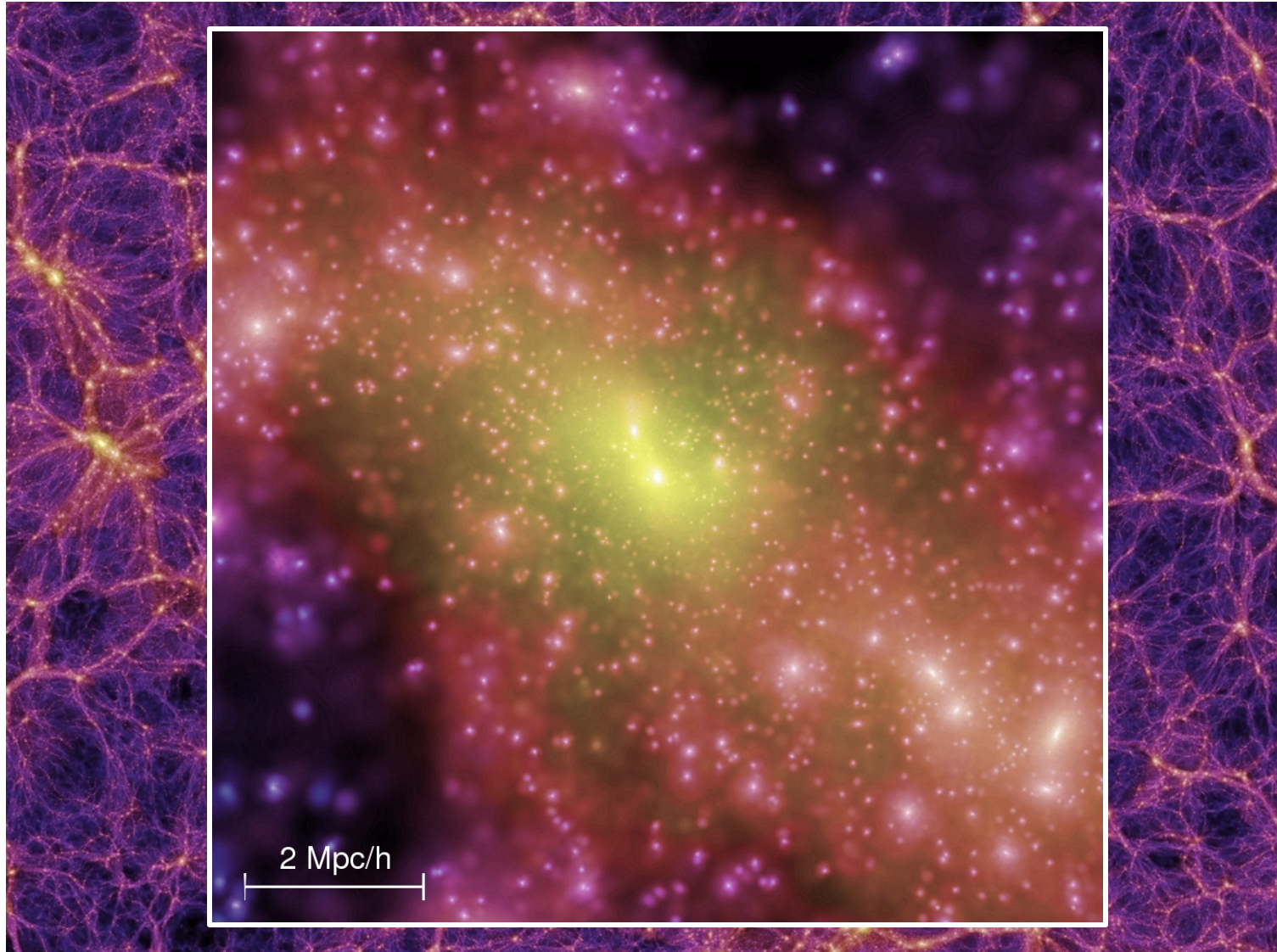
- La « masse lumineuse » = masse déduite de la présence des étoiles et des gaz qui émettent un rayonnement électromagnétique
- La masse dynamique = masse véritable, déduite de son influence gravitationnelle.

Masse dynamique = 10 à 100x Masse lumineuse !

Simulations de matière noire



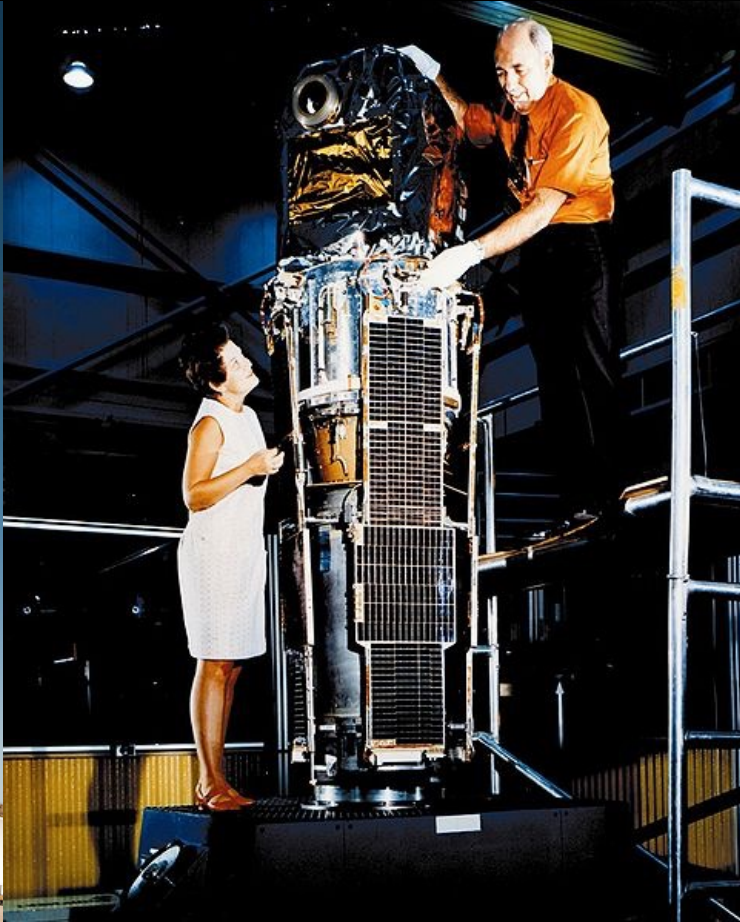
Matière noire dans les amas



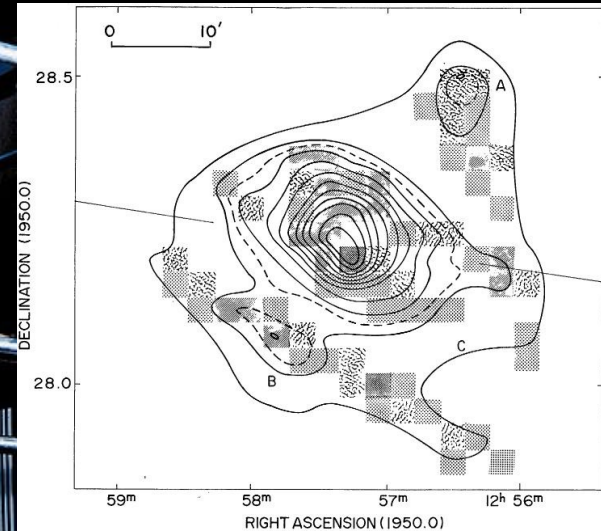
Observations X (1971)



Fusée Aerobee 150



Satellite Uhuru



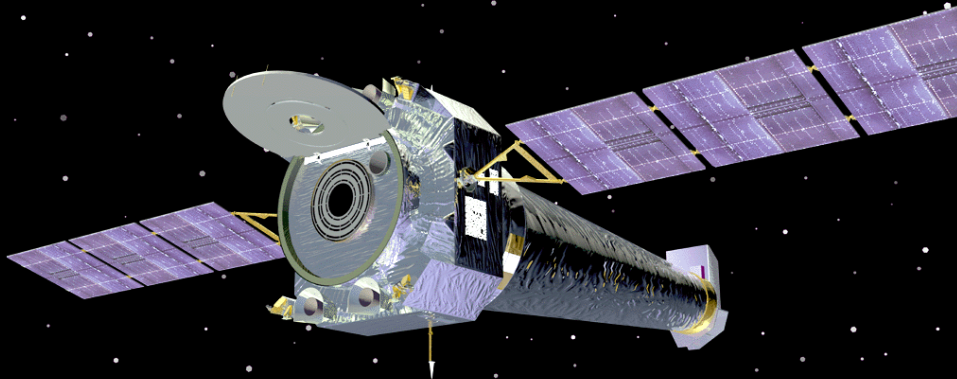
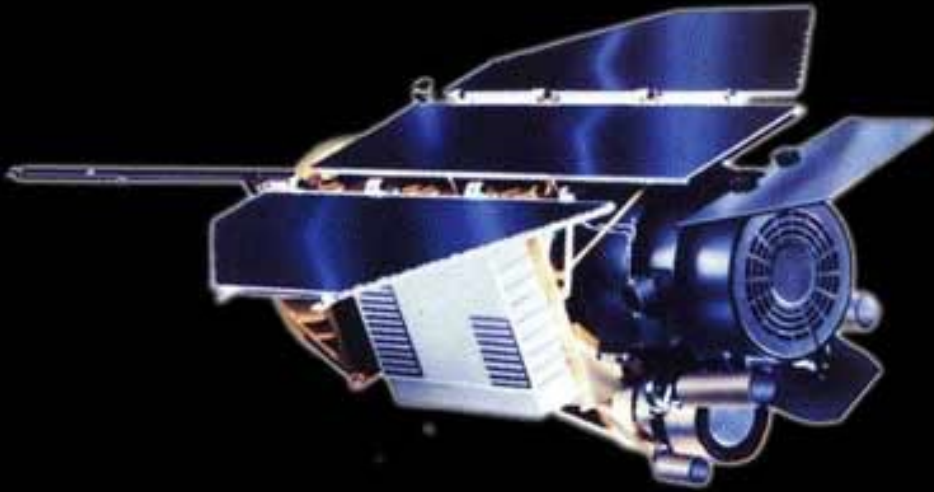
L'amas Coma



Observatoires X

ROSAT (1990)

=> Sondage de tout le ciel



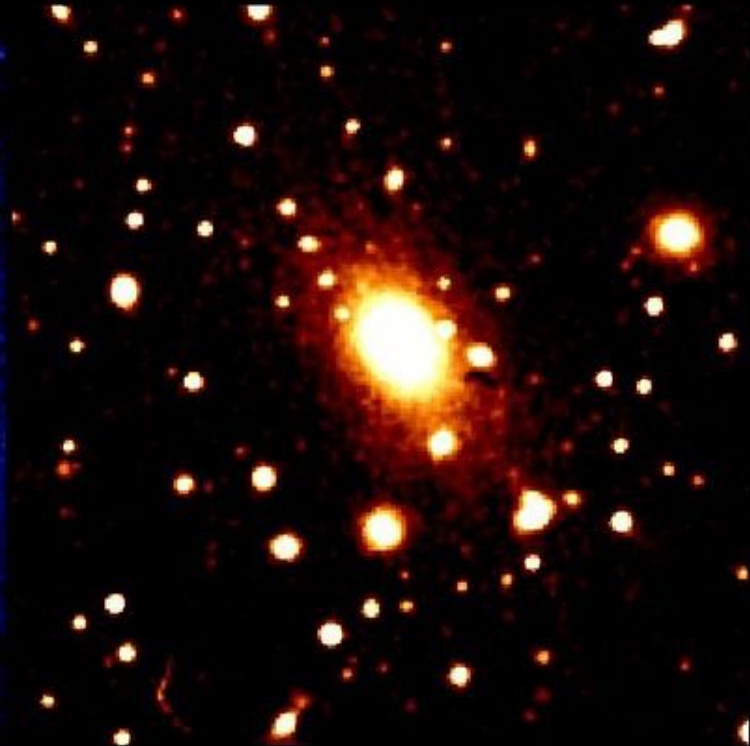
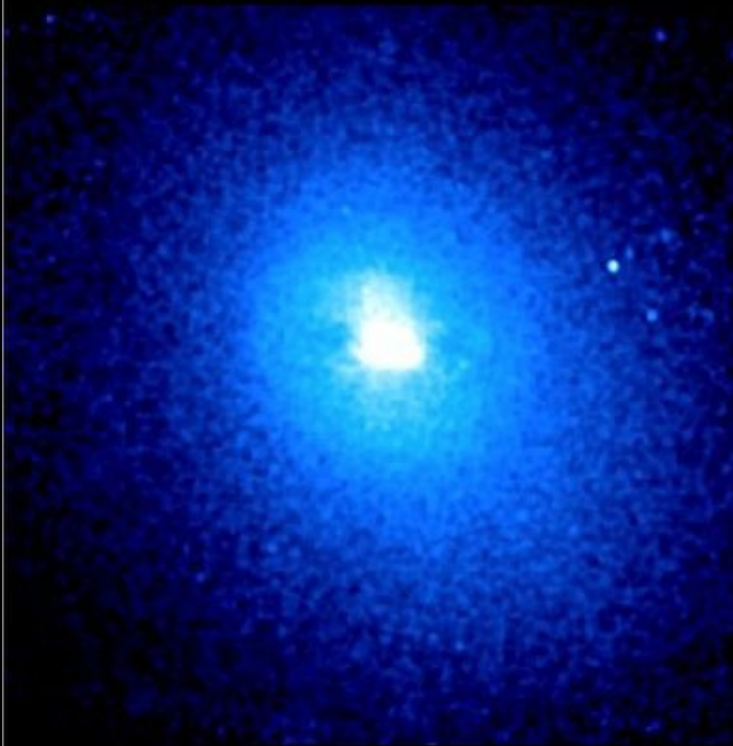
*Chandra & XMM-Newton
(1999)*

Le milieu intra-amas

Abell 2199

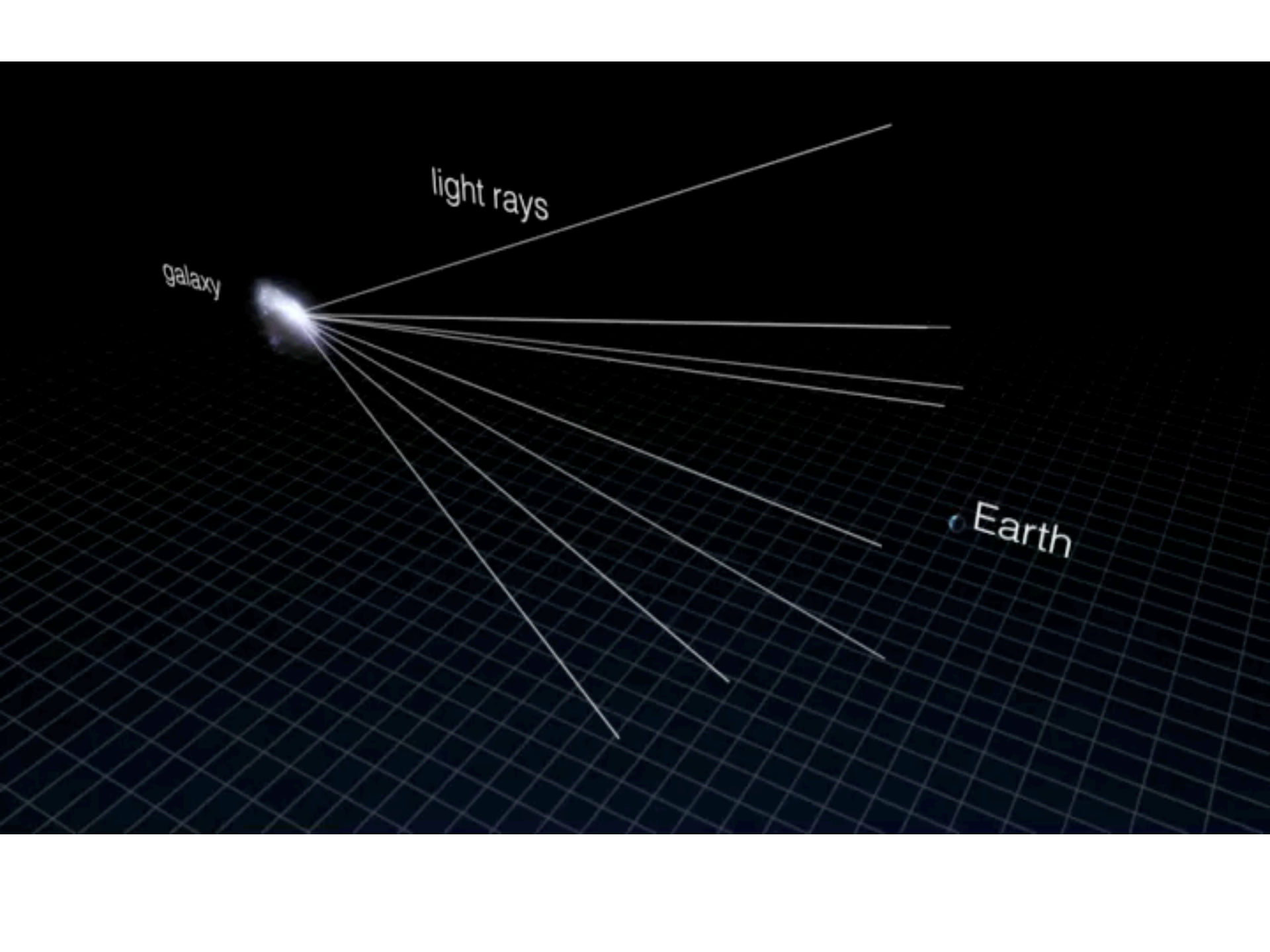
Chandra (X-ray)

DSS (Optical)



redshift, $z = 0.0309$

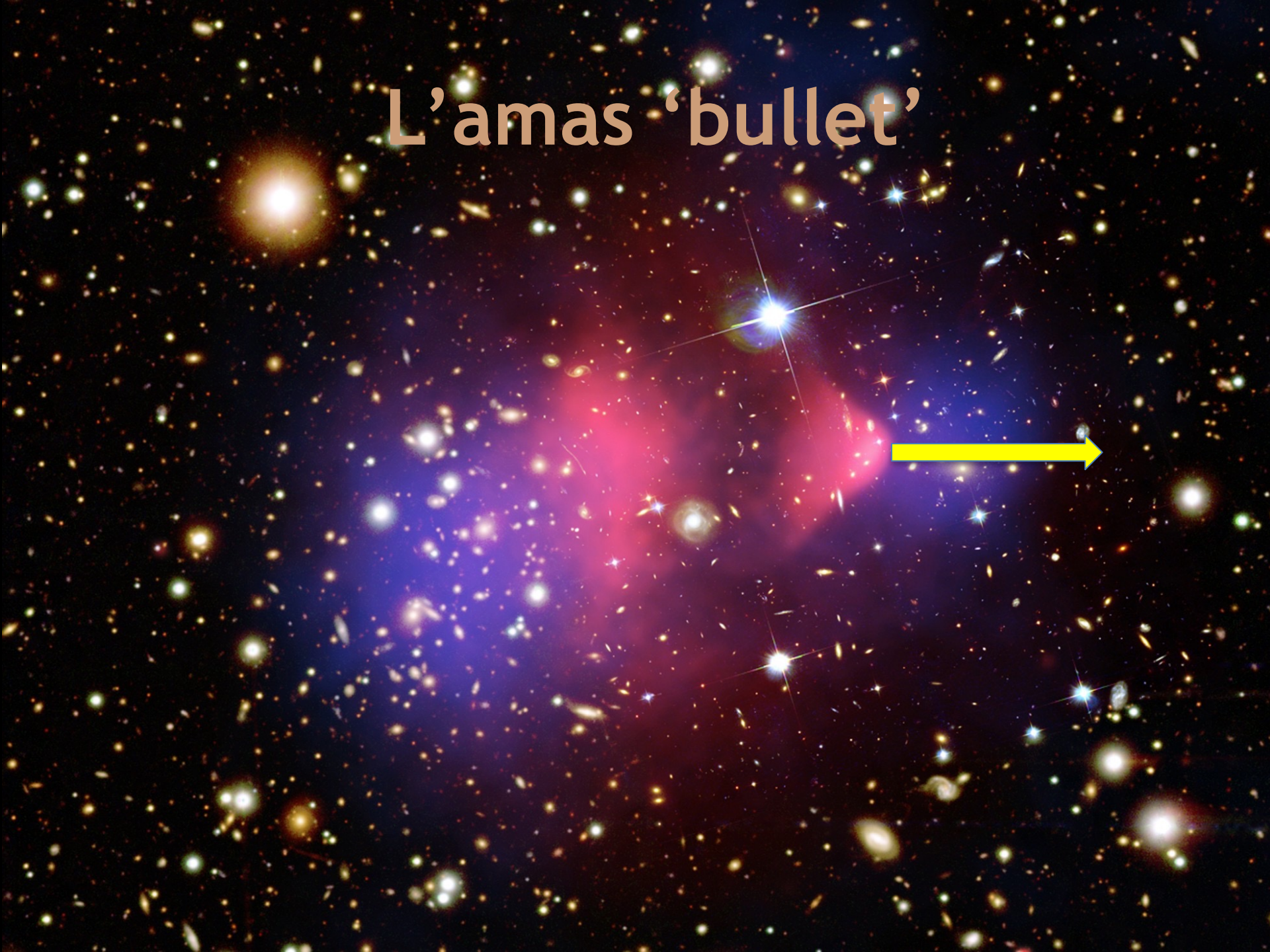
50 thousand light years



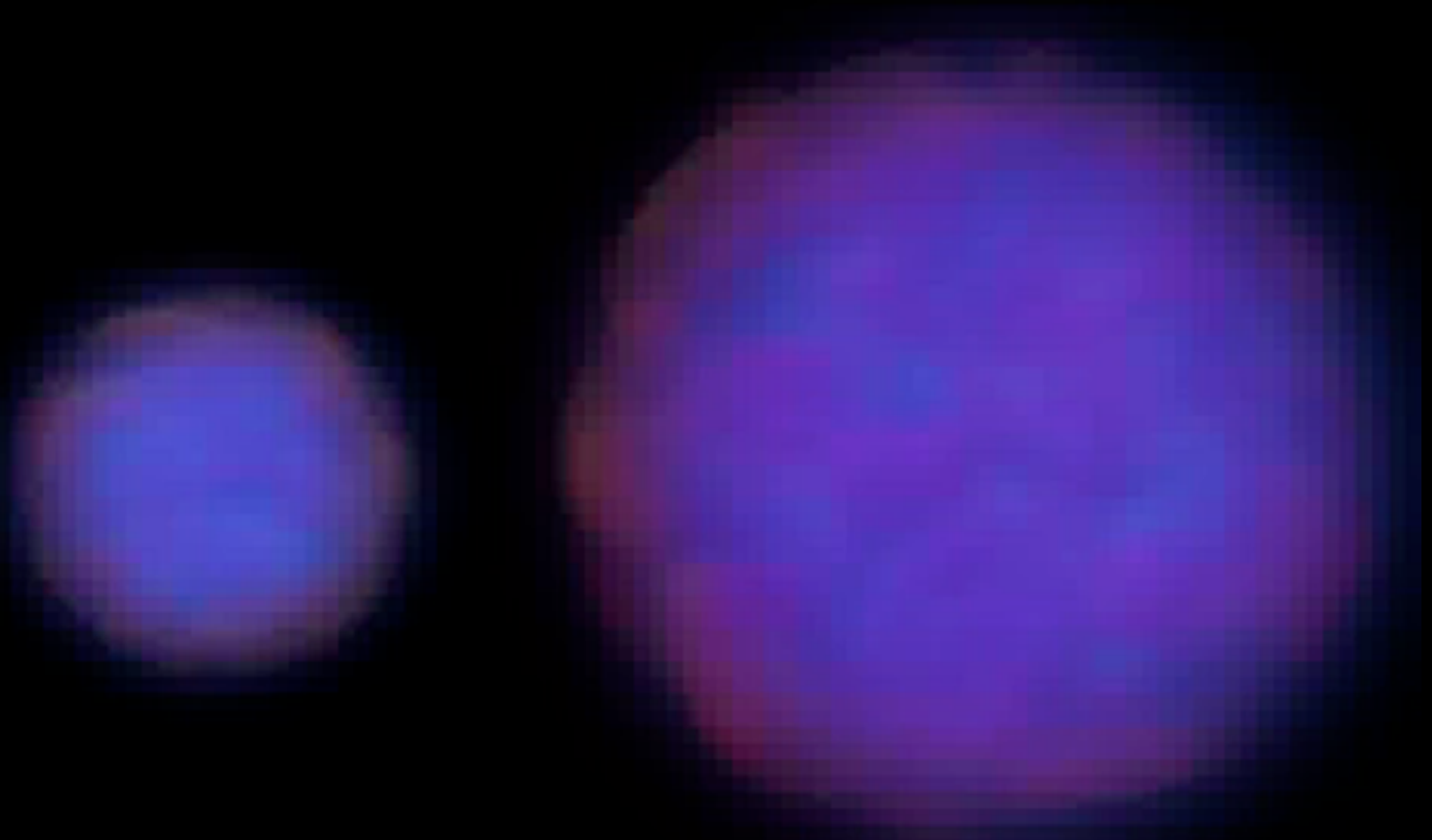




L'amas 'bullet'



L'amas 'bullet'



Un autre amas 'bullet'



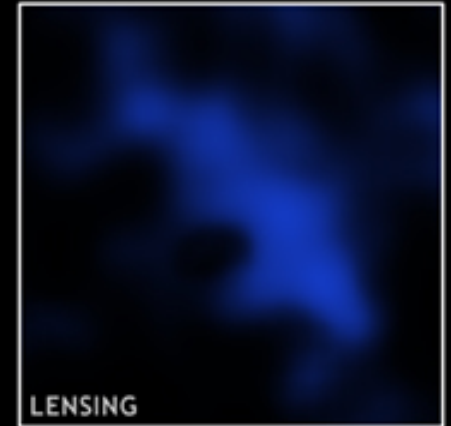
‘L’accident de train’



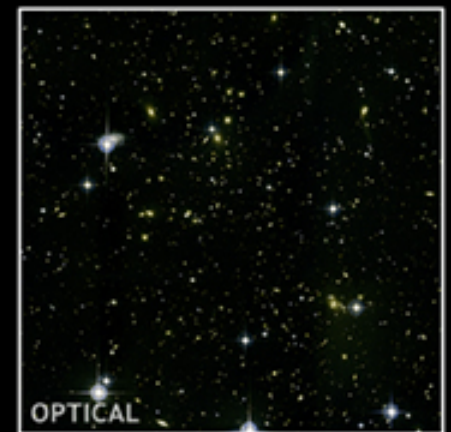
COMPOSITE



X-RAY



LENSING



OPTICAL

‘La boîte de Pandore’



Quelle est la nature de la matière noire?

- De la matière « normale » mais obscure?

- ~~– poussières?~~
- ~~– planètes, astéroïdes?~~
- étoiles noires, brunes, blanches?
- ~~– trous noirs stellaires?~~
- ~~– trous noirs géants?~~

Machos

- ~~Neutrinos?~~

- Un nouveau type de particule élémentaire stable?

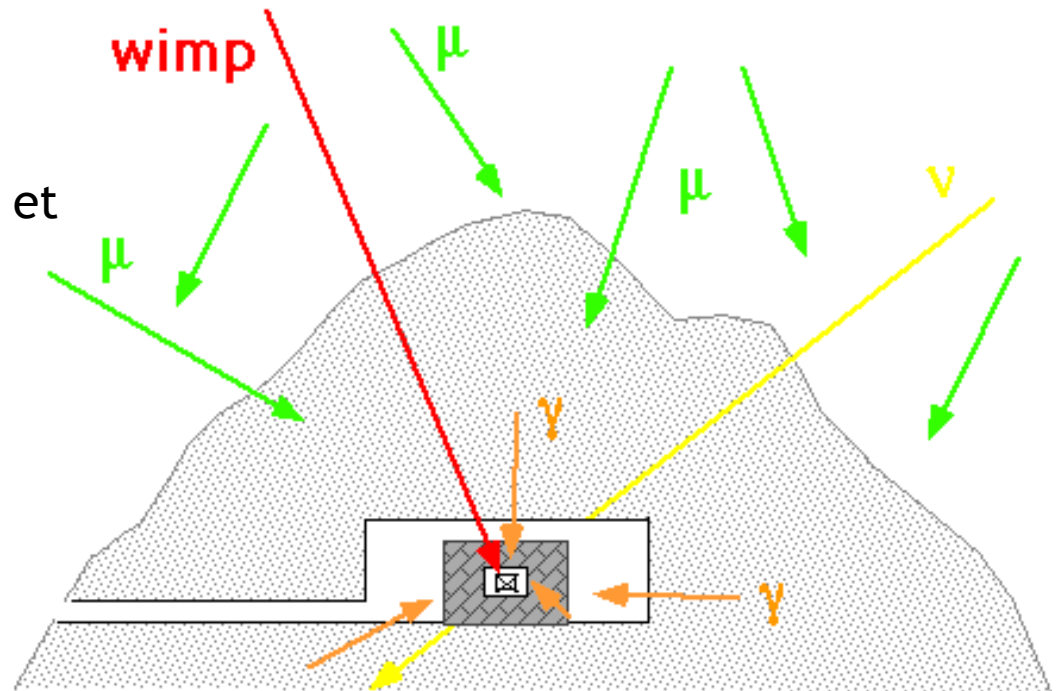
- très légère et très abondante?
- très lourde et très rare?

Axions

WIMPS (Mauviettes)

Recherches directes

- Une « mauviette » venue du halo cogne un noyau dans un cristal
- Le choc est détecté
- Difficulté: rayons cosmiques et radioactivité font pareil
- Donc on s'enterre
- On blinde le détecteur
- On le refroidit vers -270°C
- On élimine les parasites
- On attend patiemment.....



Recherches indirectes

Dans bien des modèles, une mauviette et une anti-mauviette, c'est pareil

Si le halo est plein de mauviettes, elles doivent donc s'annihiler fréquemment

Le résultat de ces annihilations pourrait être une paire de rayons gamma, « facile » à détecter du sol ou de l'espace



Télescopes à rayons gamma de HESS, en Namibie

La théorie MOND

(théorie de la dynamique newtonienne modifiée)

$\mathbf{a} = G \frac{M}{r^2}$ n'est vrai que jusqu'à une certaine échelle

au delà l'accélération décroît comme l'inverse de la distance

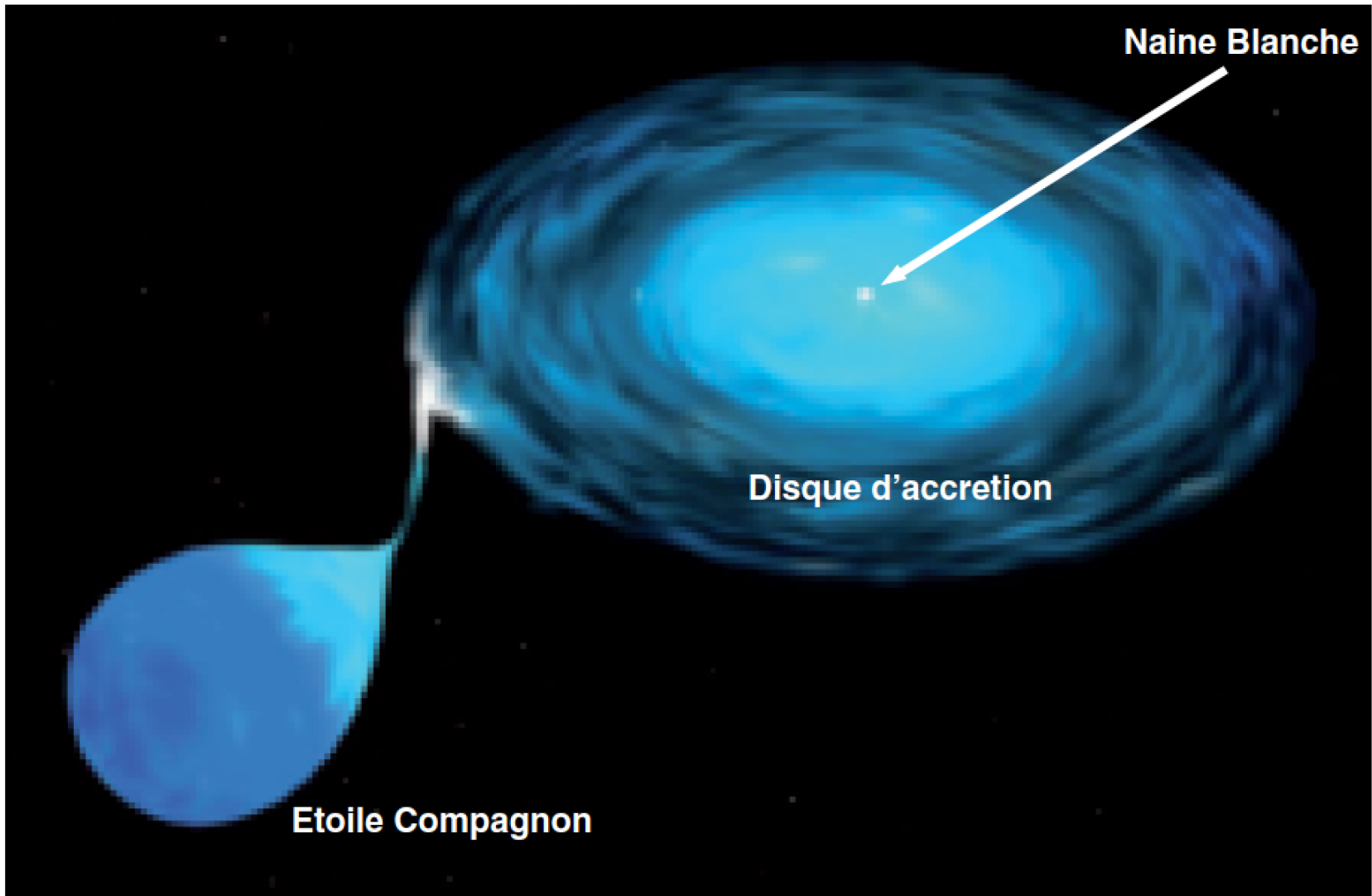
Cependant:

- difficultés à reproduire la croissance des structures
- difficultés à reproduire les effets de lentille gravitationnelle

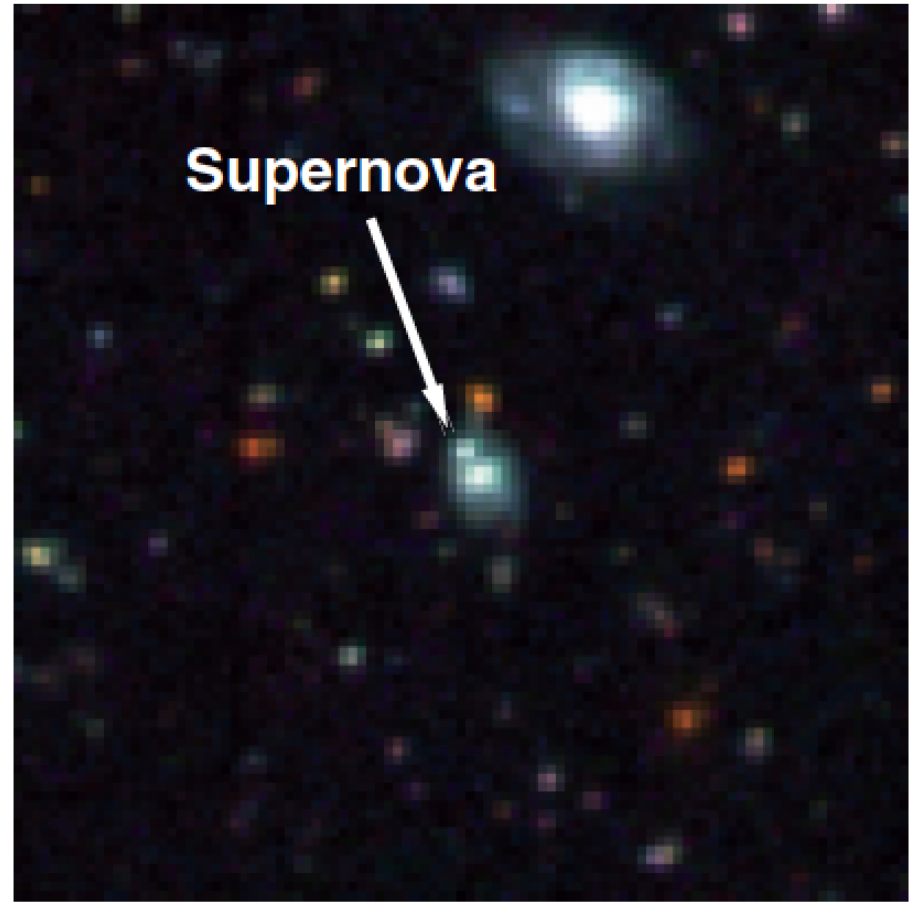
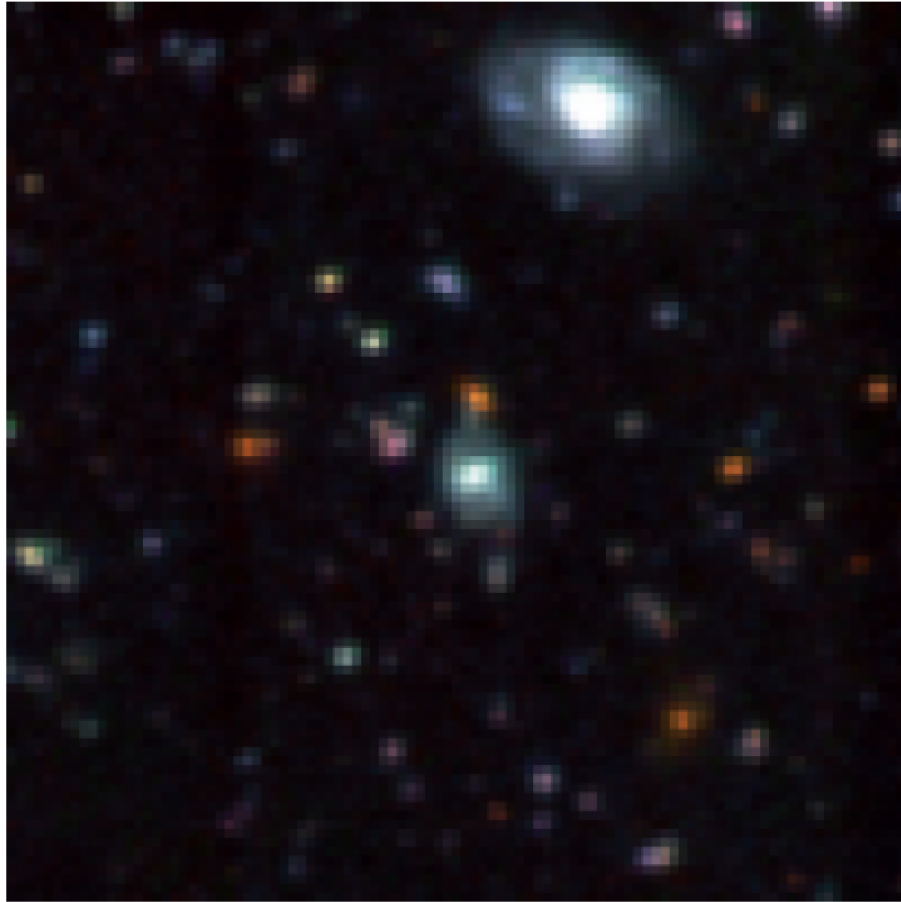
Energie Noire



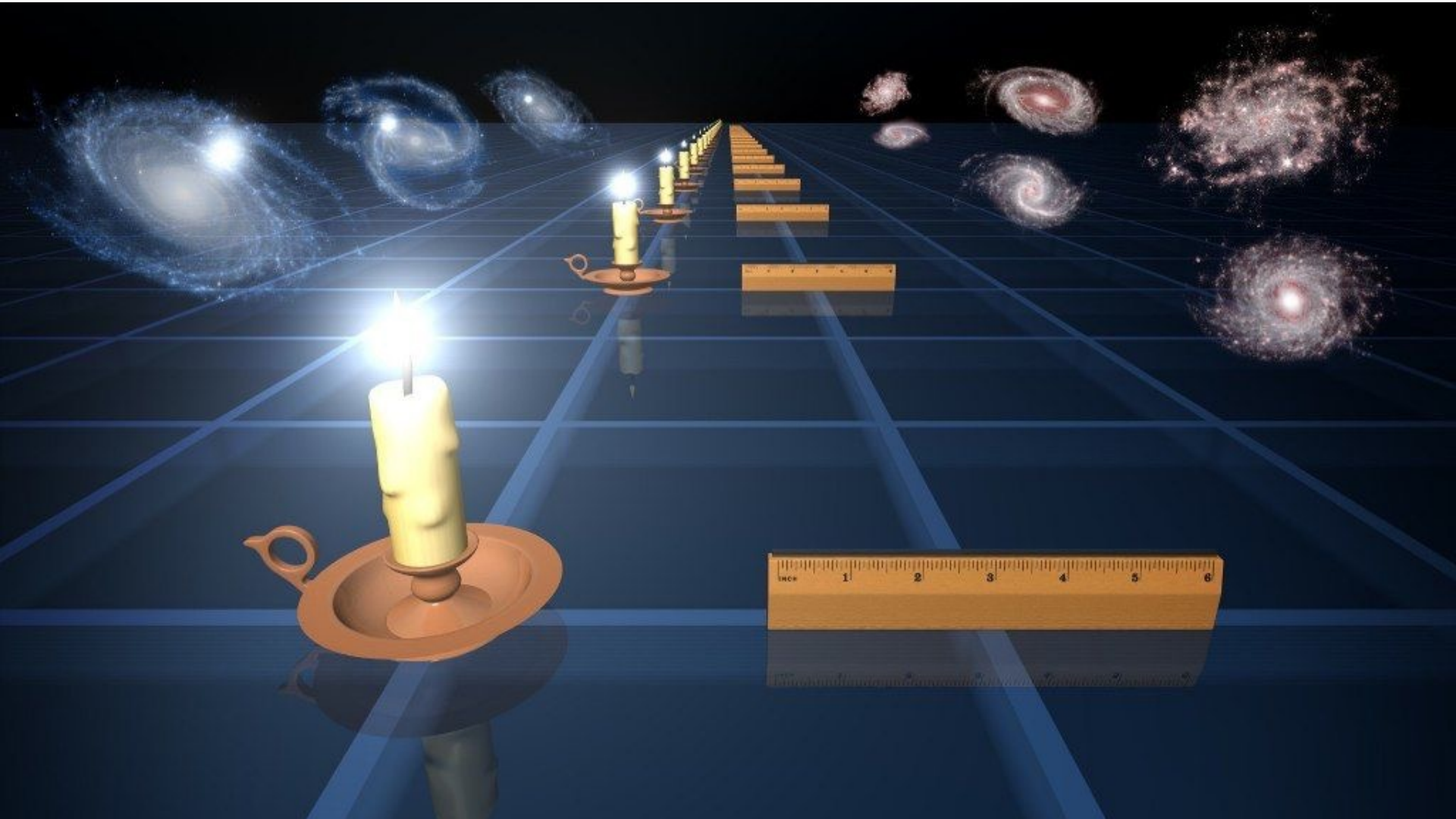
Observations de supernovae (1998)



Observations de supernovae (1998)



Observations de supernovae (1998)



log(distance de luminosité)

44
42
40
38
36
34

SNLS 1ère année

0,2

0,4

0,6

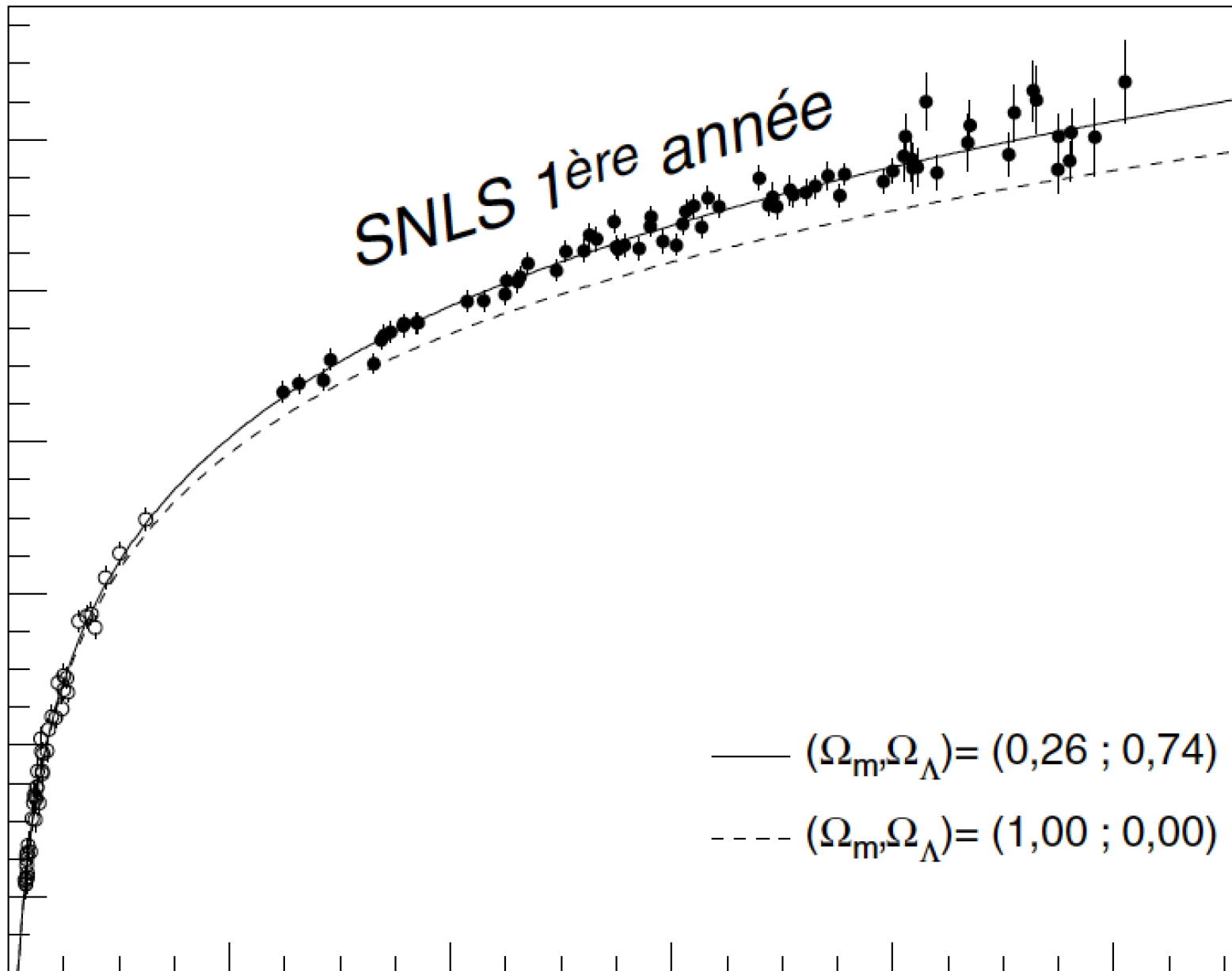
0,8

1

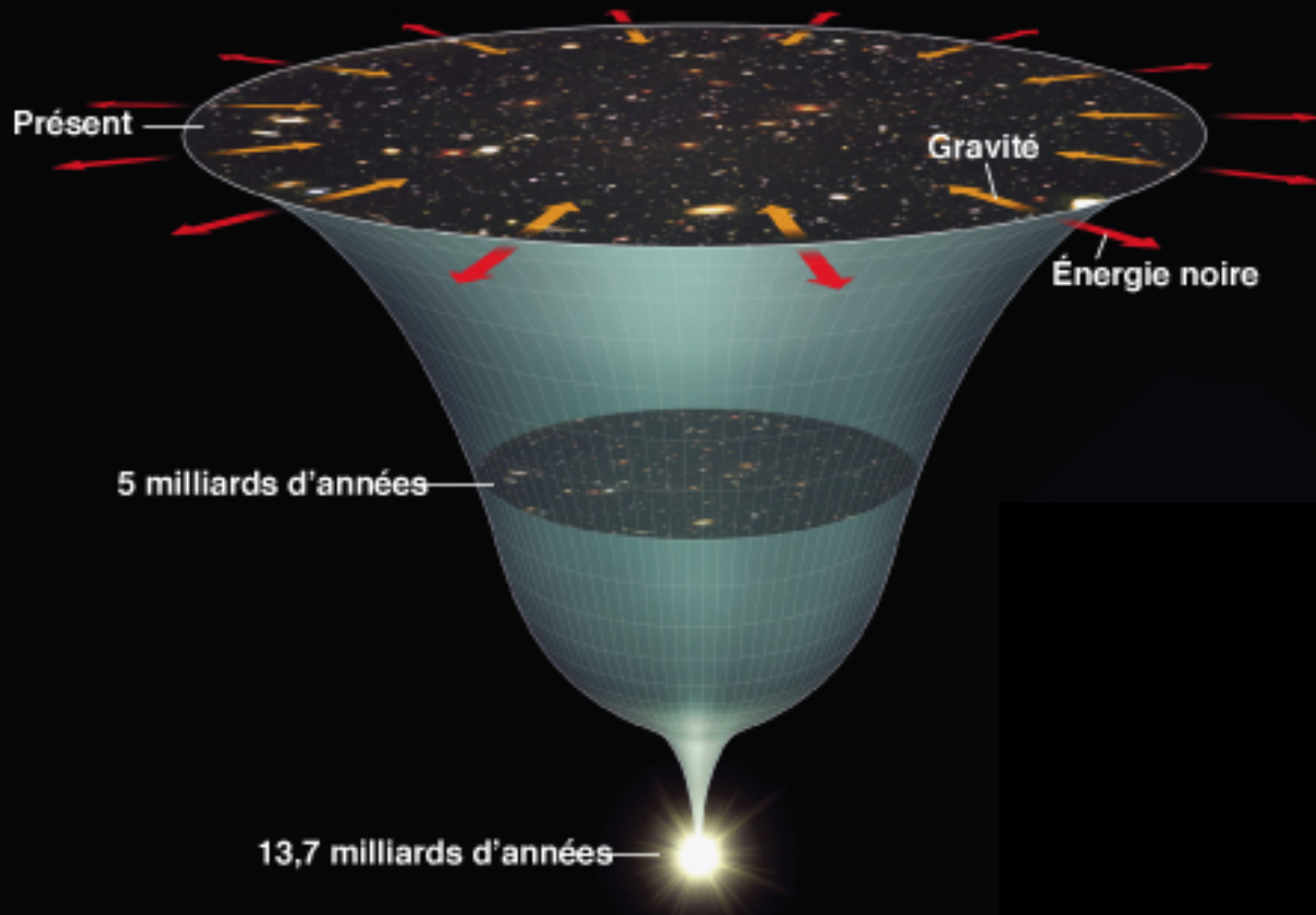
Décalage spectral (z)

— $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0,26 ; 0,74)$

- - - $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (1,00 ; 0,00)$



L'expansion de l'Univers



Energie noire ?

- Energie contenue dans tout l'Univers de manière uniforme
- Agit comme une force répulsive, qui contre-balance la gravité
- Equivalent à une densité 10^{-29} g/cm³
- Plusieurs hypothèses pour expliquer cette énergie:
 - Propriétés intrinsèques du vide
 - Nouvelles particules
 - Nouvelles théories physiques

SCALE OF THE UNIVERSE

BIG BANG

DECELERATION

ACCELERATION

PRESENT

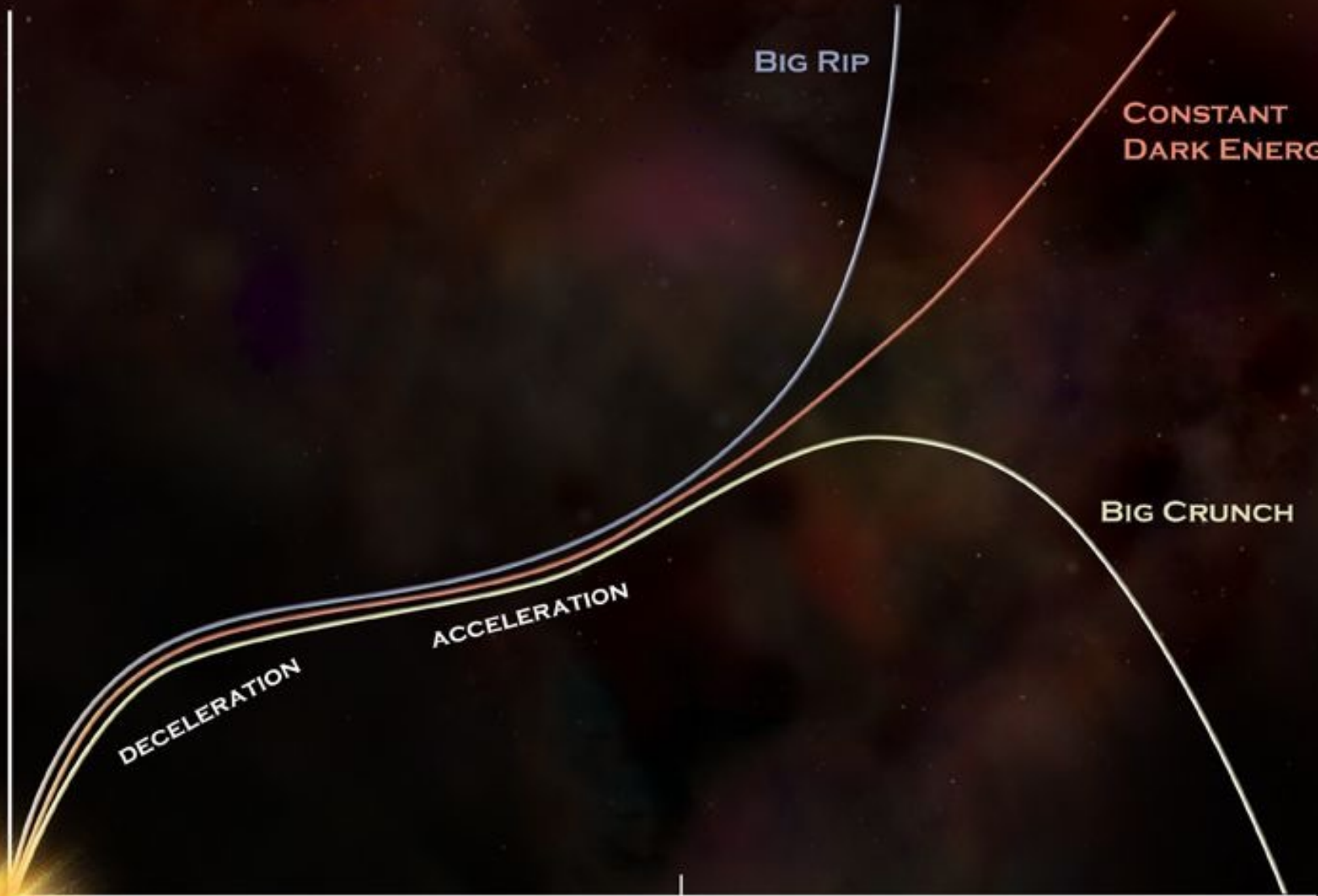
TIME

CONSTANT DARK ENERGY

BIG RIP

BIG CRUNCH

FUTURE



Bilan

