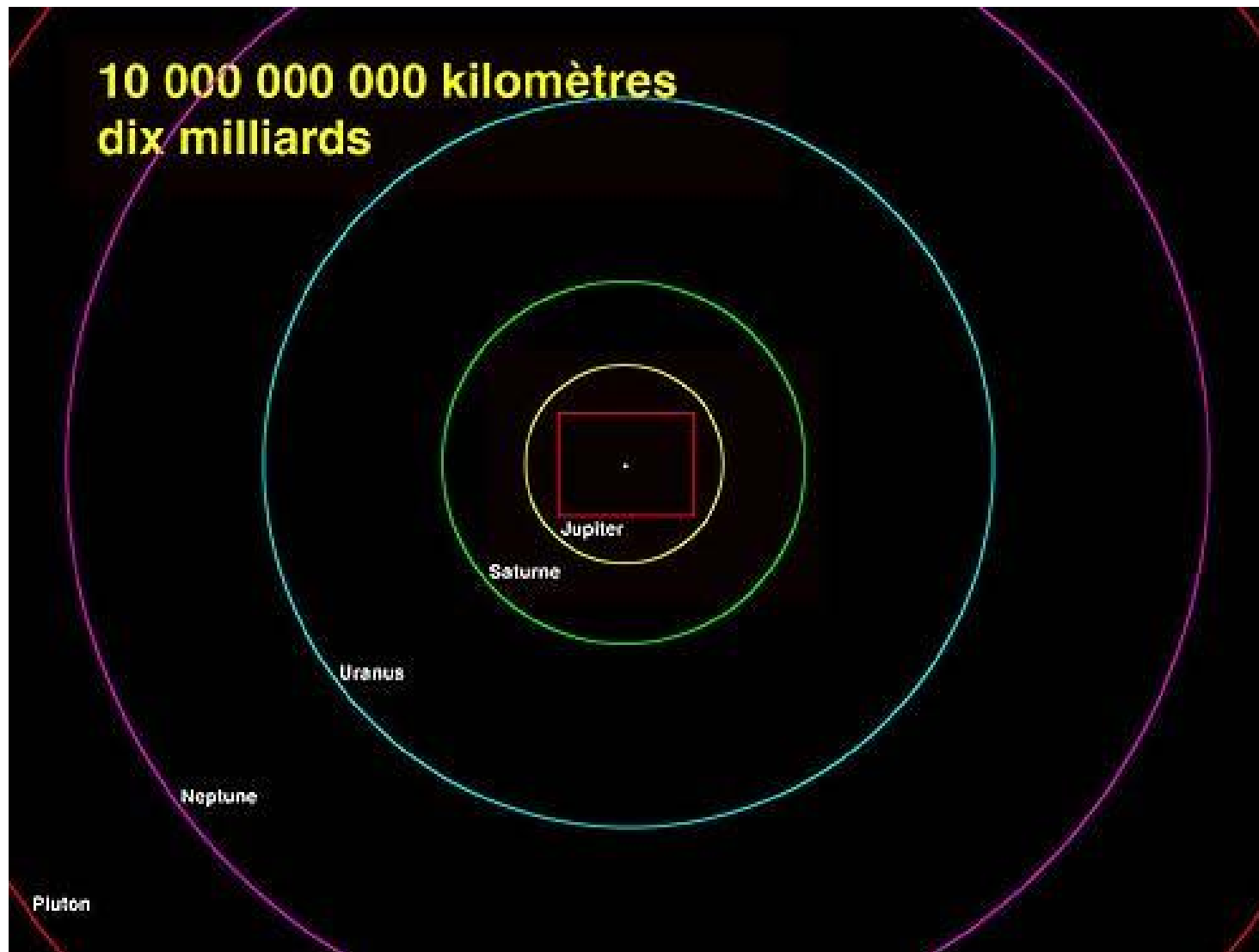


Chapitre 9

Les galaxies et l'Univers

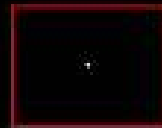
10 000 000 000 kilomètres
dix milliards



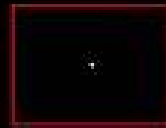
100 000 000 000 kilomètres
cent milliards



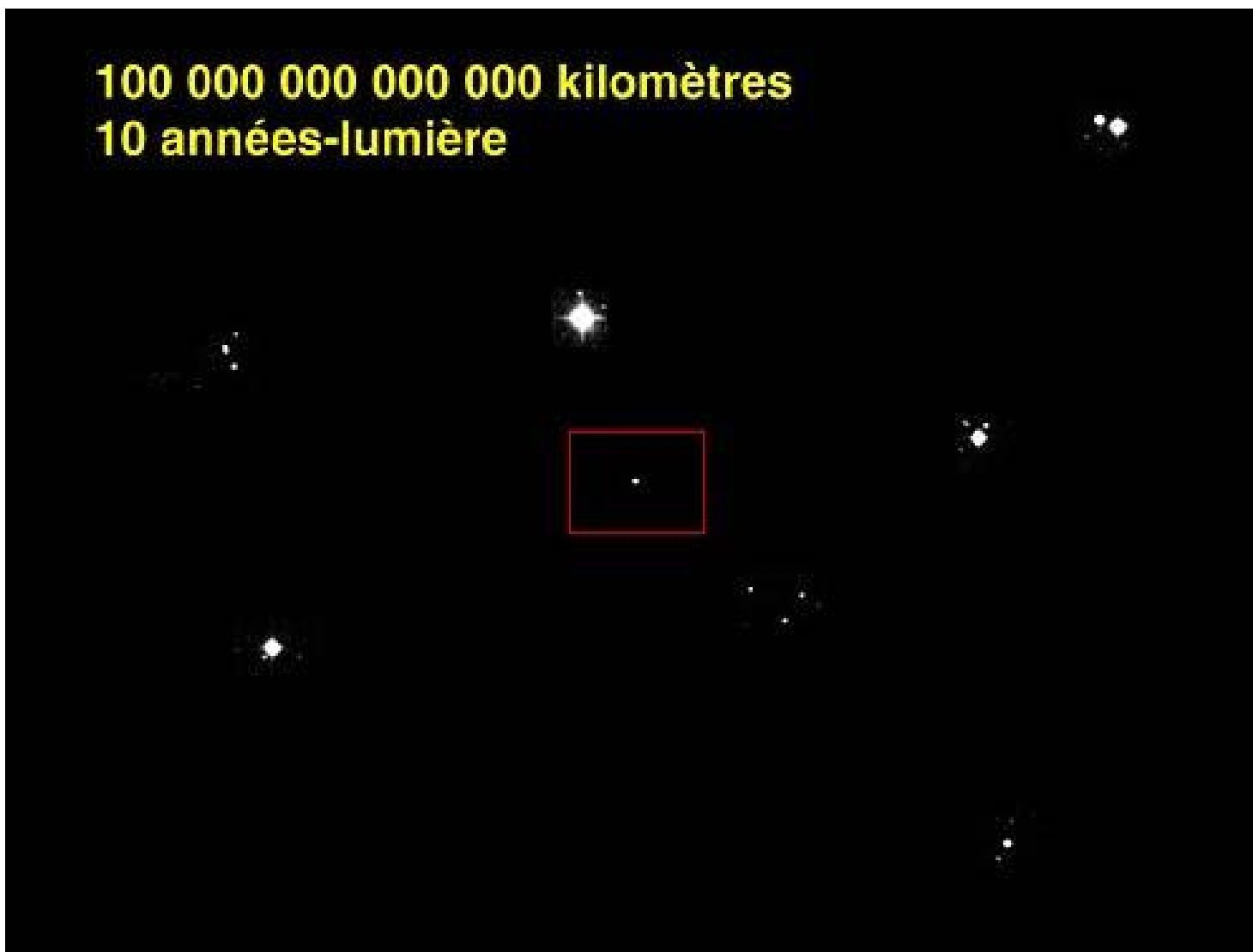
1 000 000 000 000 kilomètres
mille milliards



10 000 000 000 000 kilomètres
dix mille milliards
une année-lumière



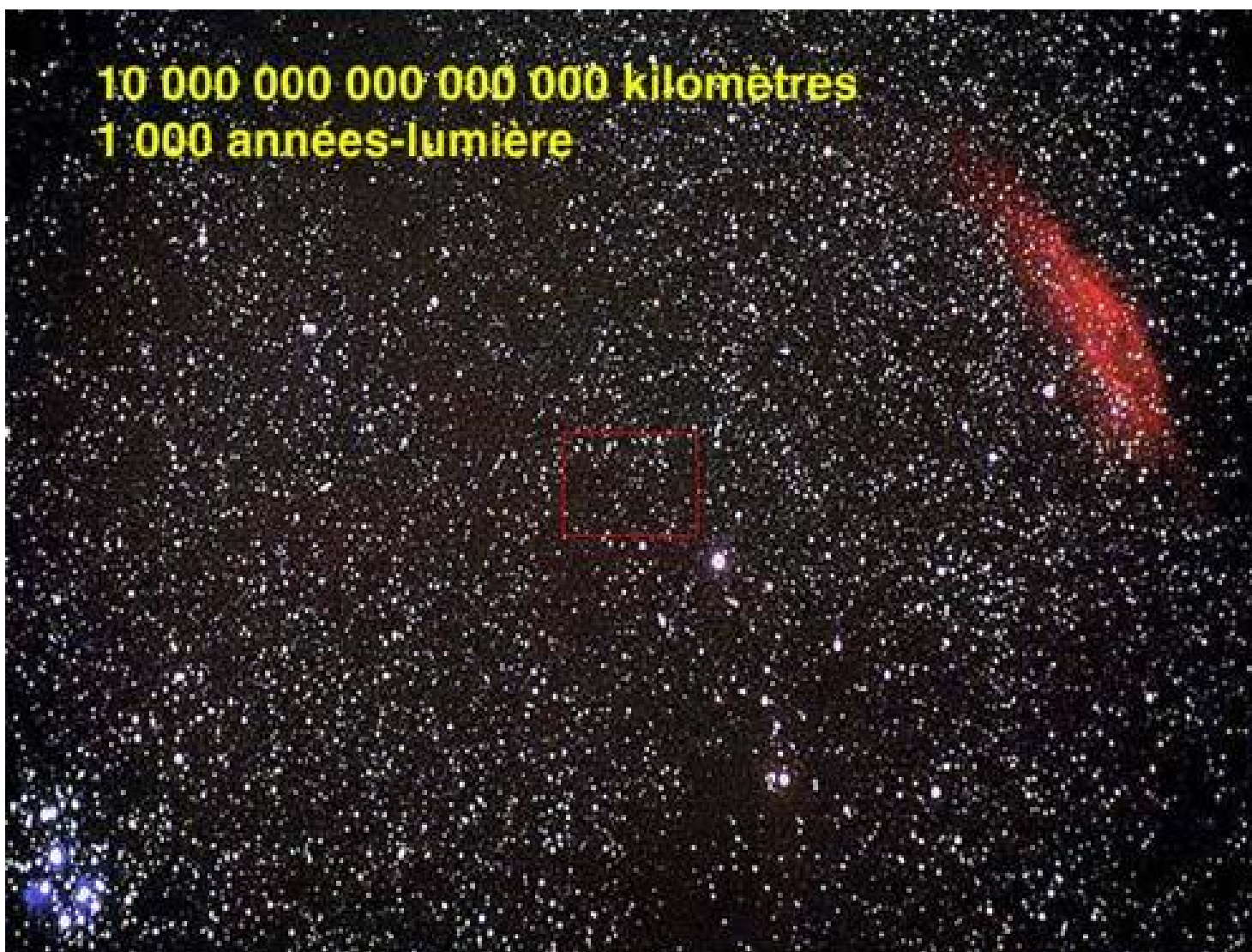
100 000 000 000 000 kilomètres
10 années-lumière



1 000 000 000 000 000 kilomètres
100 années-lumière



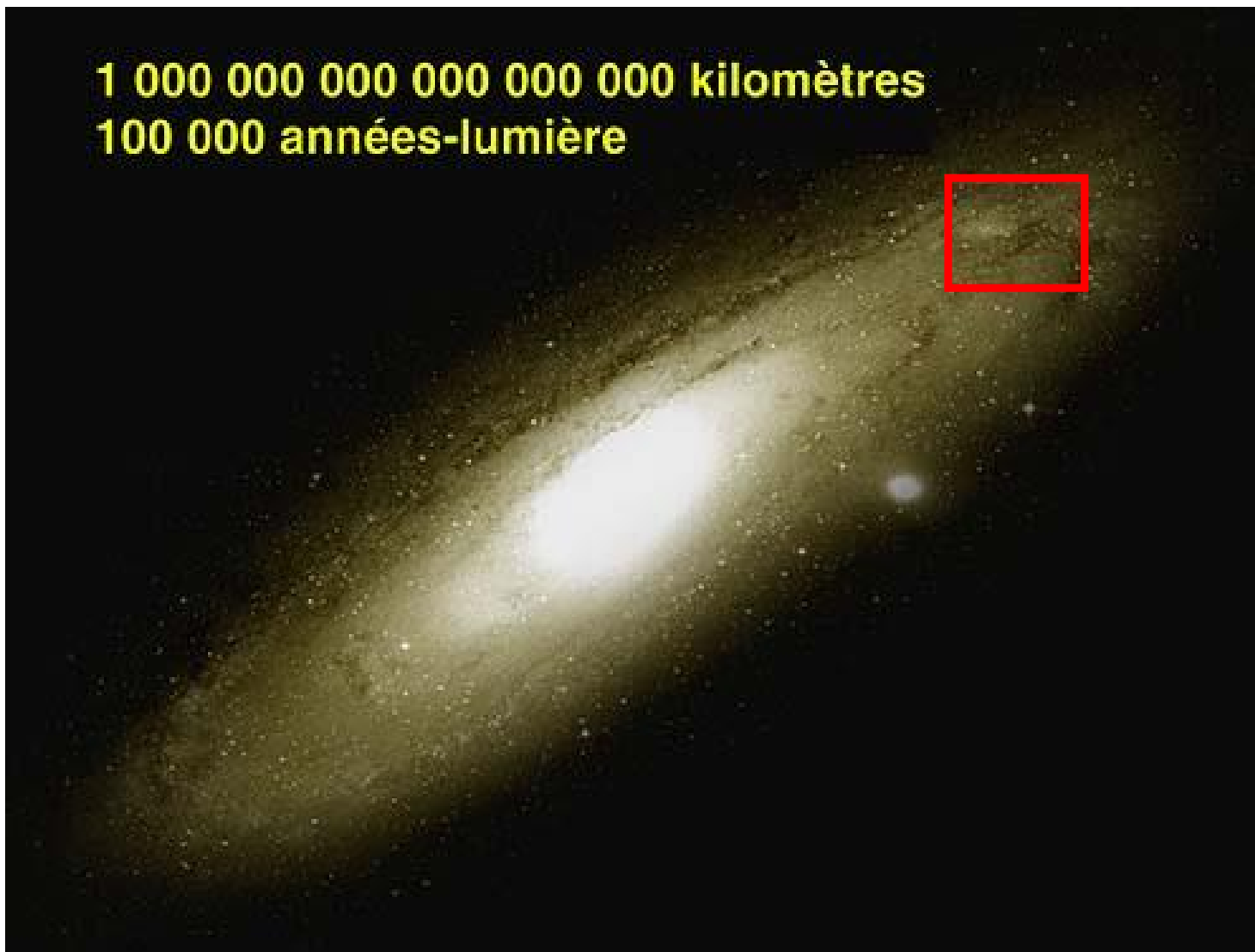
10 000 000 000 000 000 kilomètres
1 000 années-lumière



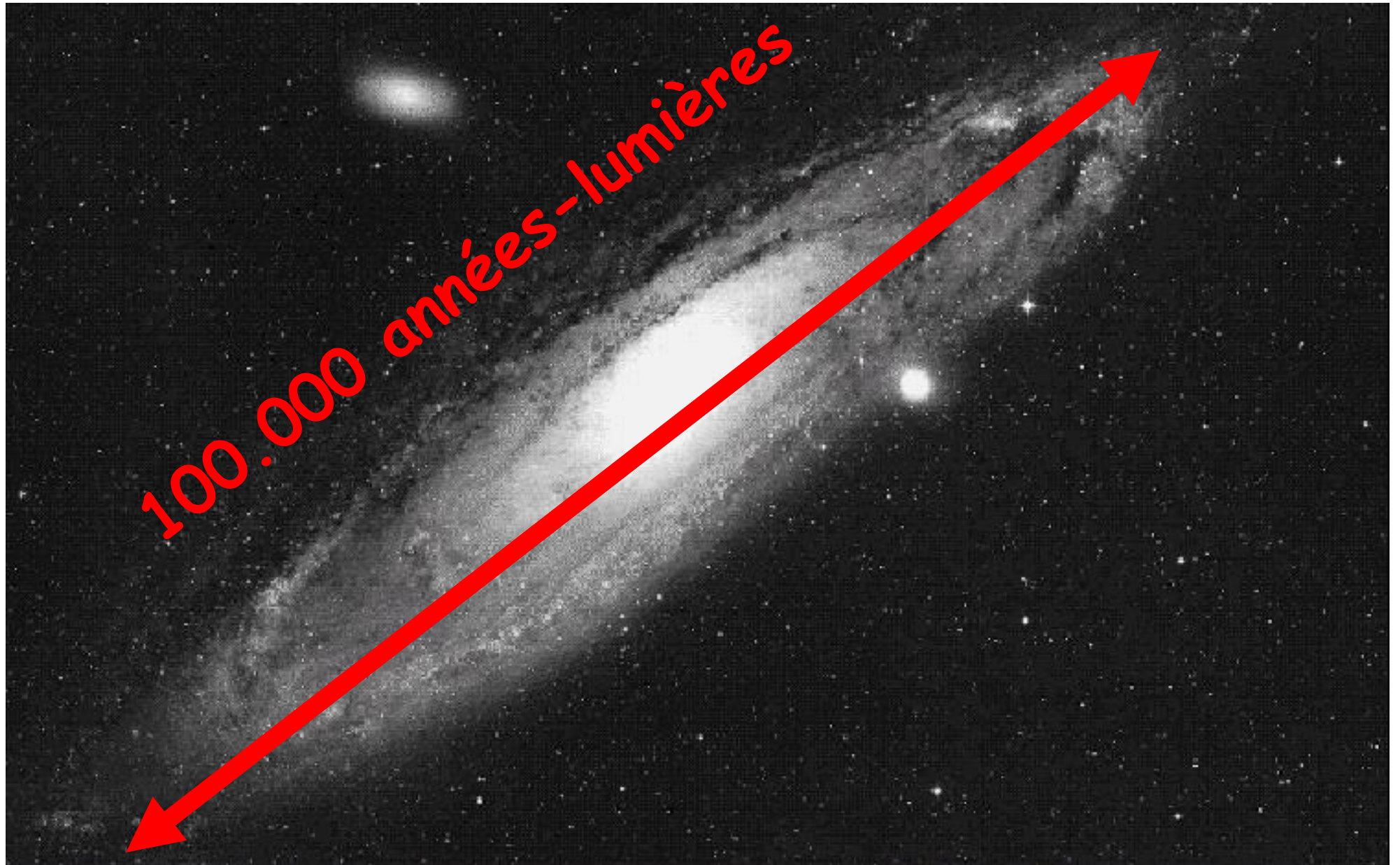
100 000 000 000 000 000 kilomètres
10 000 années-lumière



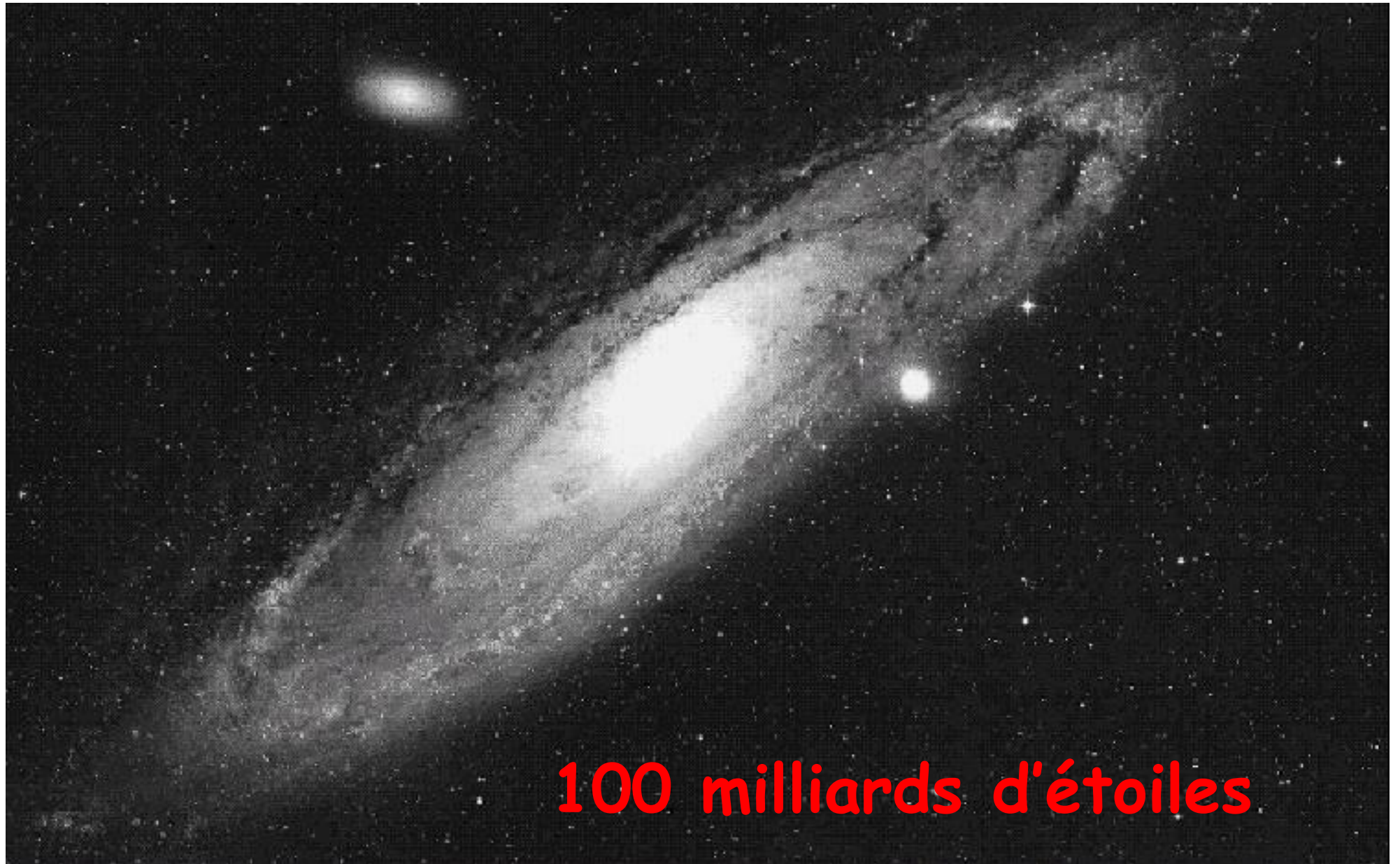
1 000 000 000 000 000 000 kilomètres
100 000 années-lumière



Notre galaxie



Notre galaxie



Notre galaxie



Nous
sommes
ici

Vue du dessus

Notre galaxie



Révolution 250 millions d'années

Notre galaxie



Vitesse 230 km/s

Notre galaxie

Nous sommes ici



Vue par la tranche

Notre galaxie



Direction Le Sagittaire

La Voie Lactée

Notre galaxie



aire

La Voie Lactée

Notre galaxie



La Voie Lactée - Le Sagittaire

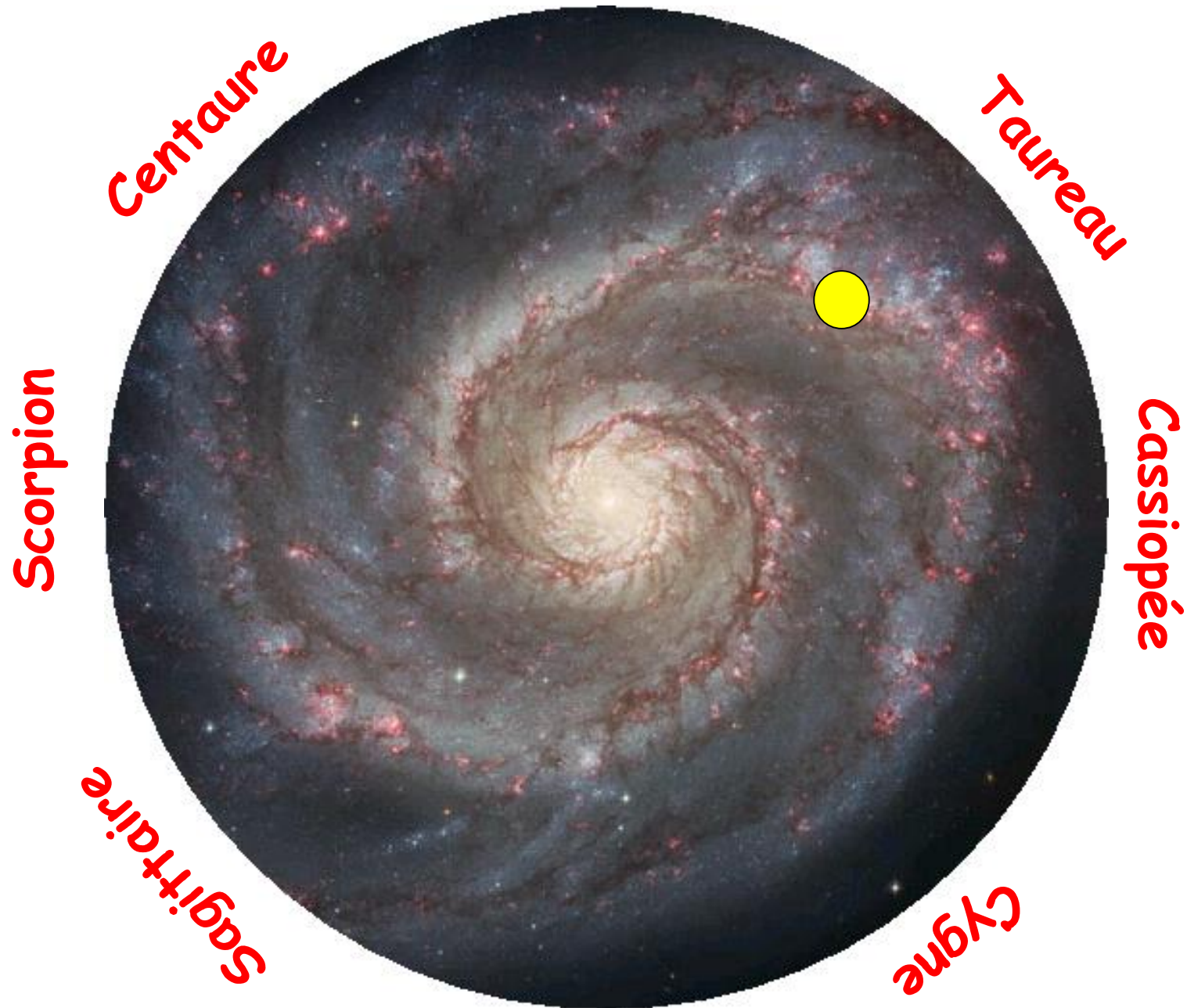
Notre galaxie

Nous sommes ici



La Voie Lactée

Notre galaxie

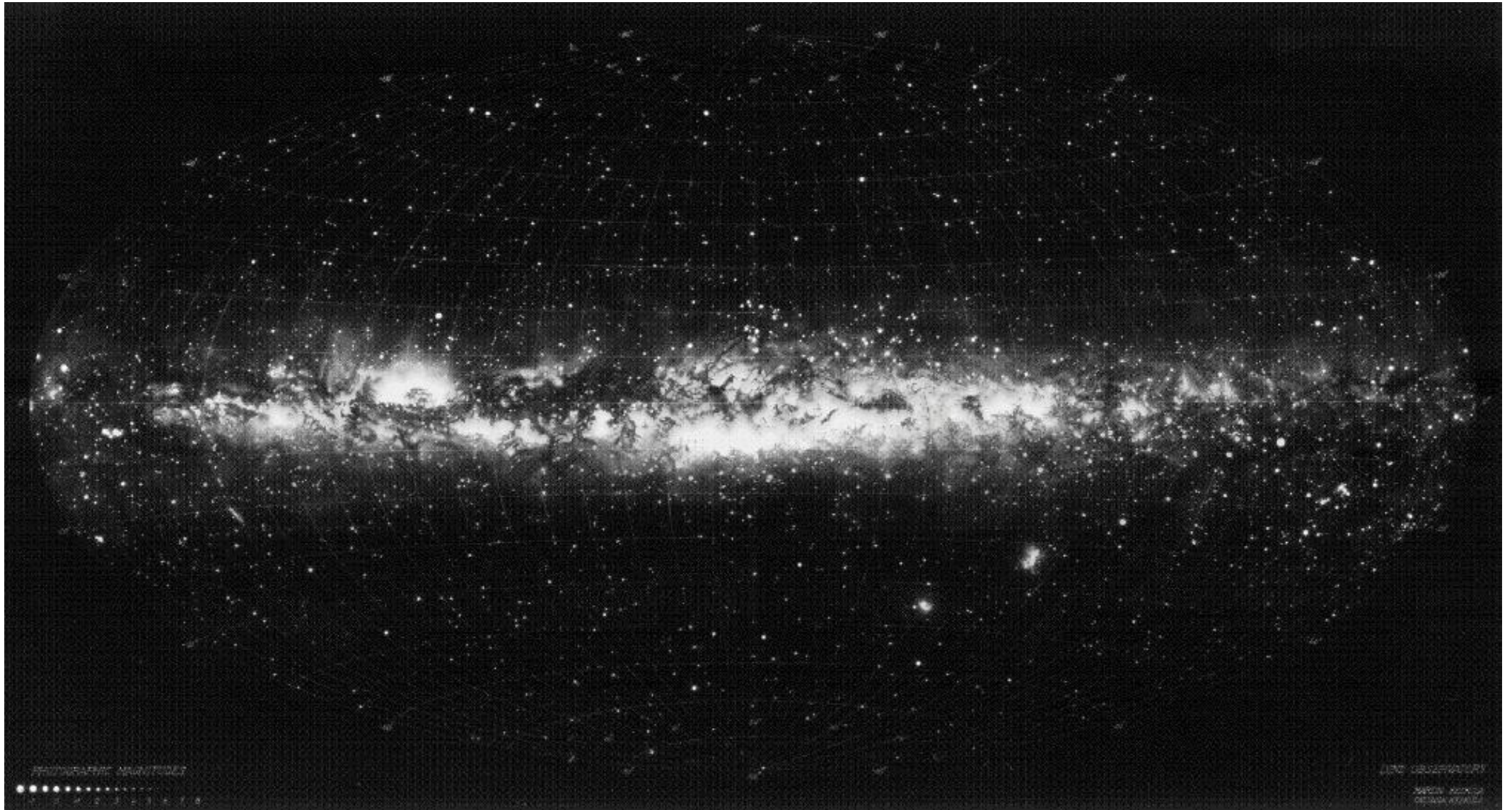


Notre galaxie



La Voie Lactée

Voie Lactée



Gouttes de lait tombées du sein
de Junon allaitant Hercule

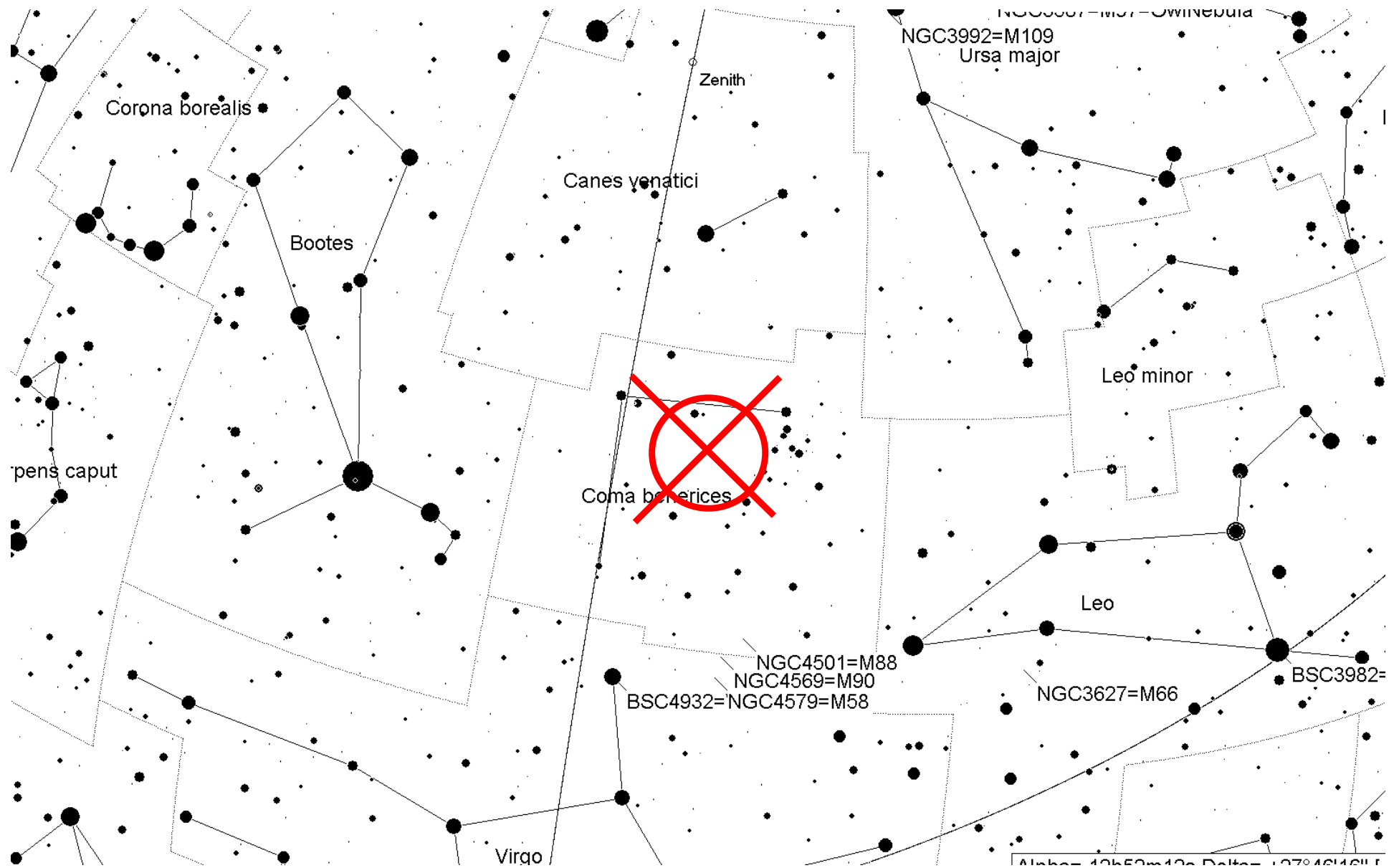
Notre galaxie



Direction Chevelure de Bérénice

La Voie Lactée

Pôle galactique



Vue sur l'Univers



Coma Berenices

Type de galaxies



Spirales

Type de galaxies



Spirales barrées

Type de galaxies



Spirales barrées

Type de galaxies



Spirales barrées

Type de galaxies



Spirales vues par la tranche

Type de galaxies



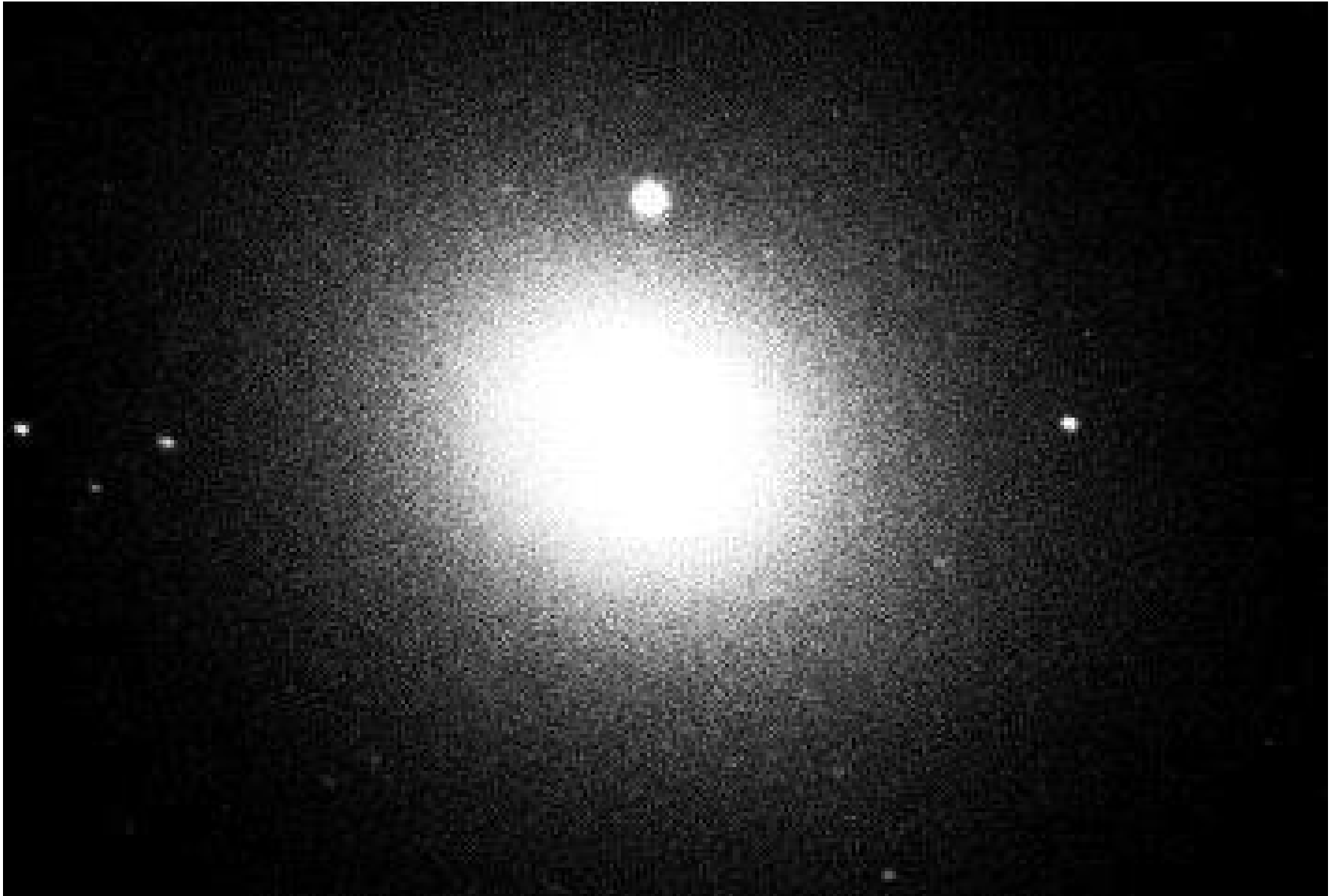
Lenticulaires

Type de galaxies



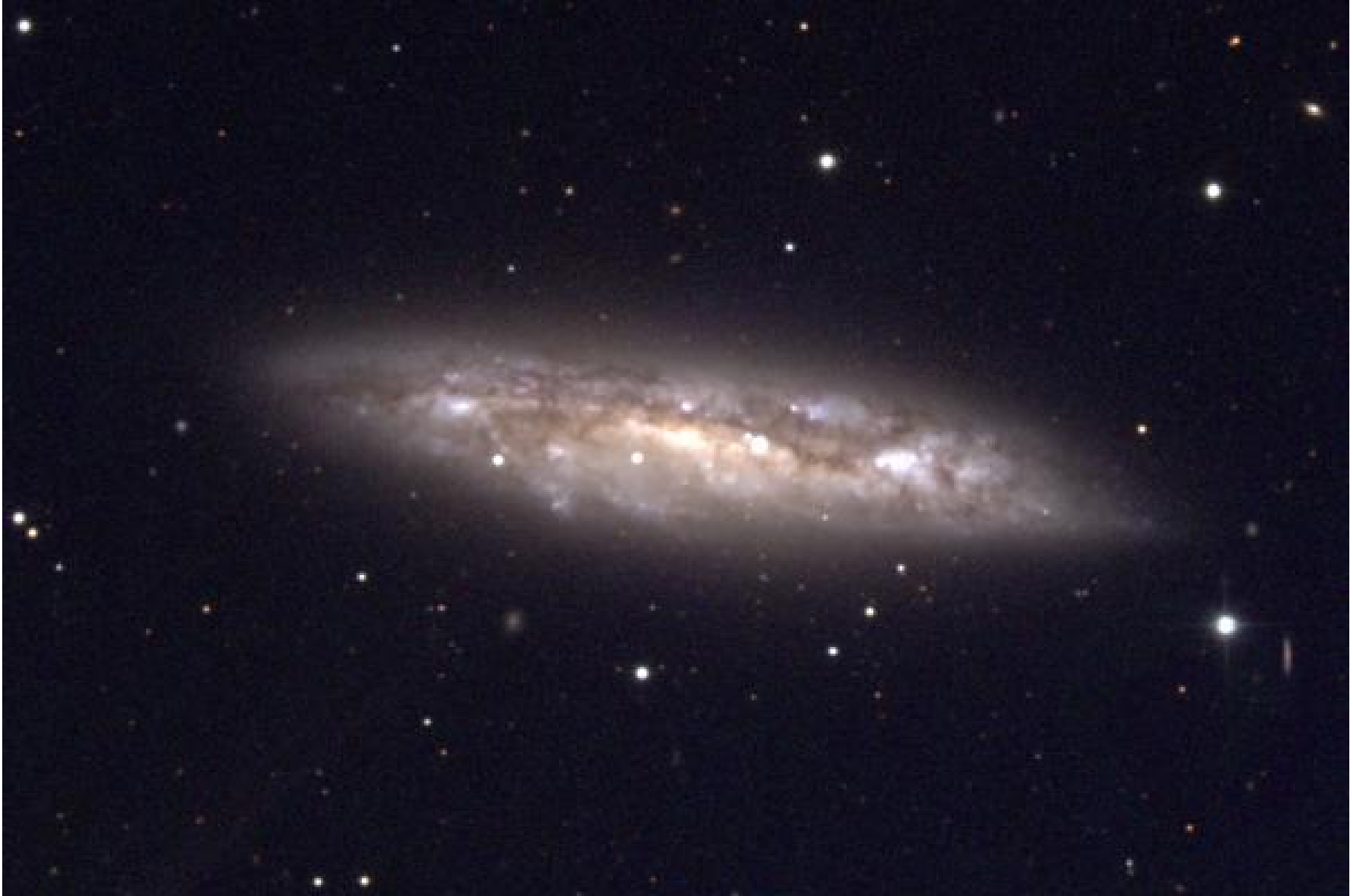
Elliptiques

Type de galaxies



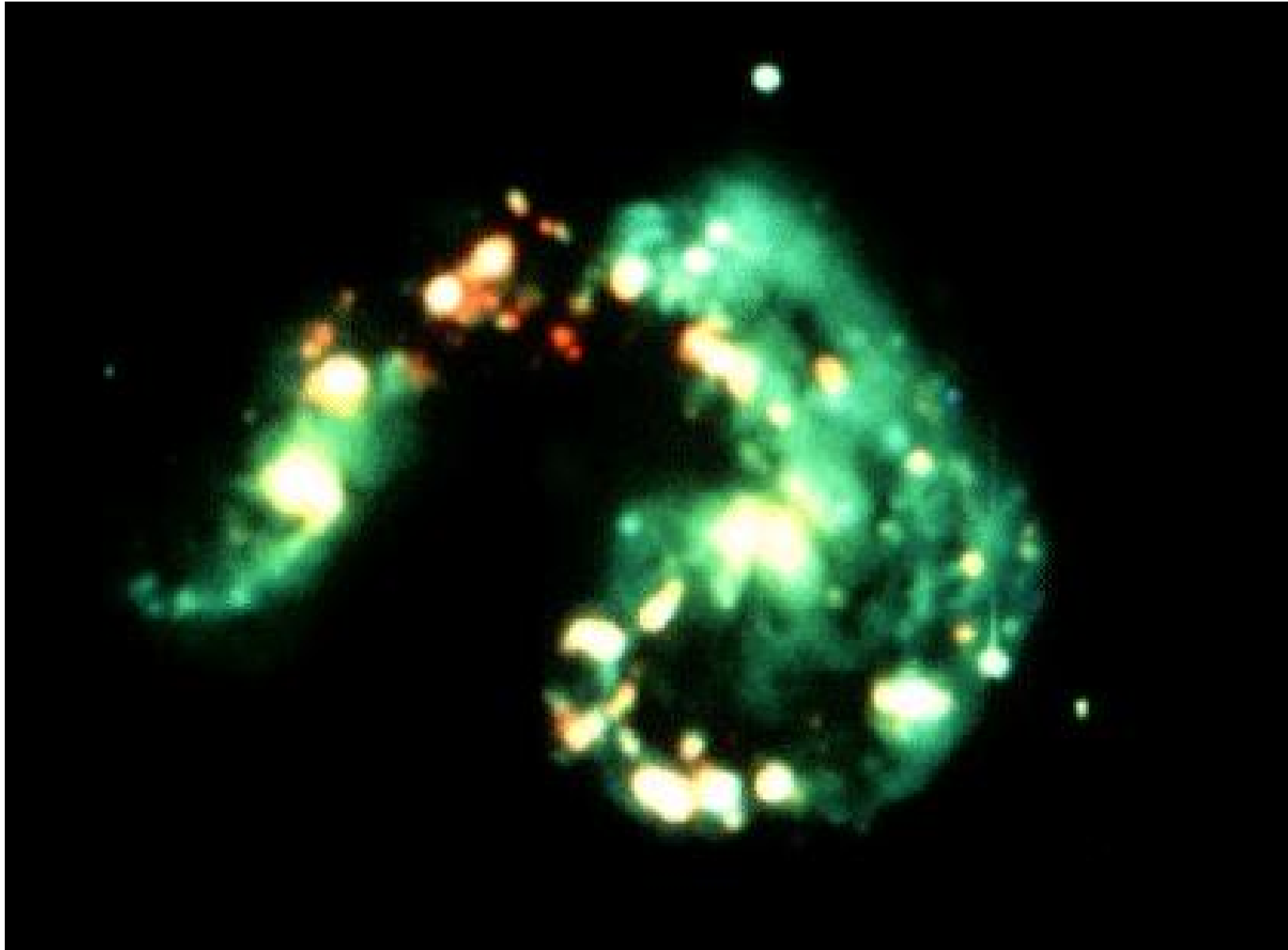
Elliptiques

Type de galaxies



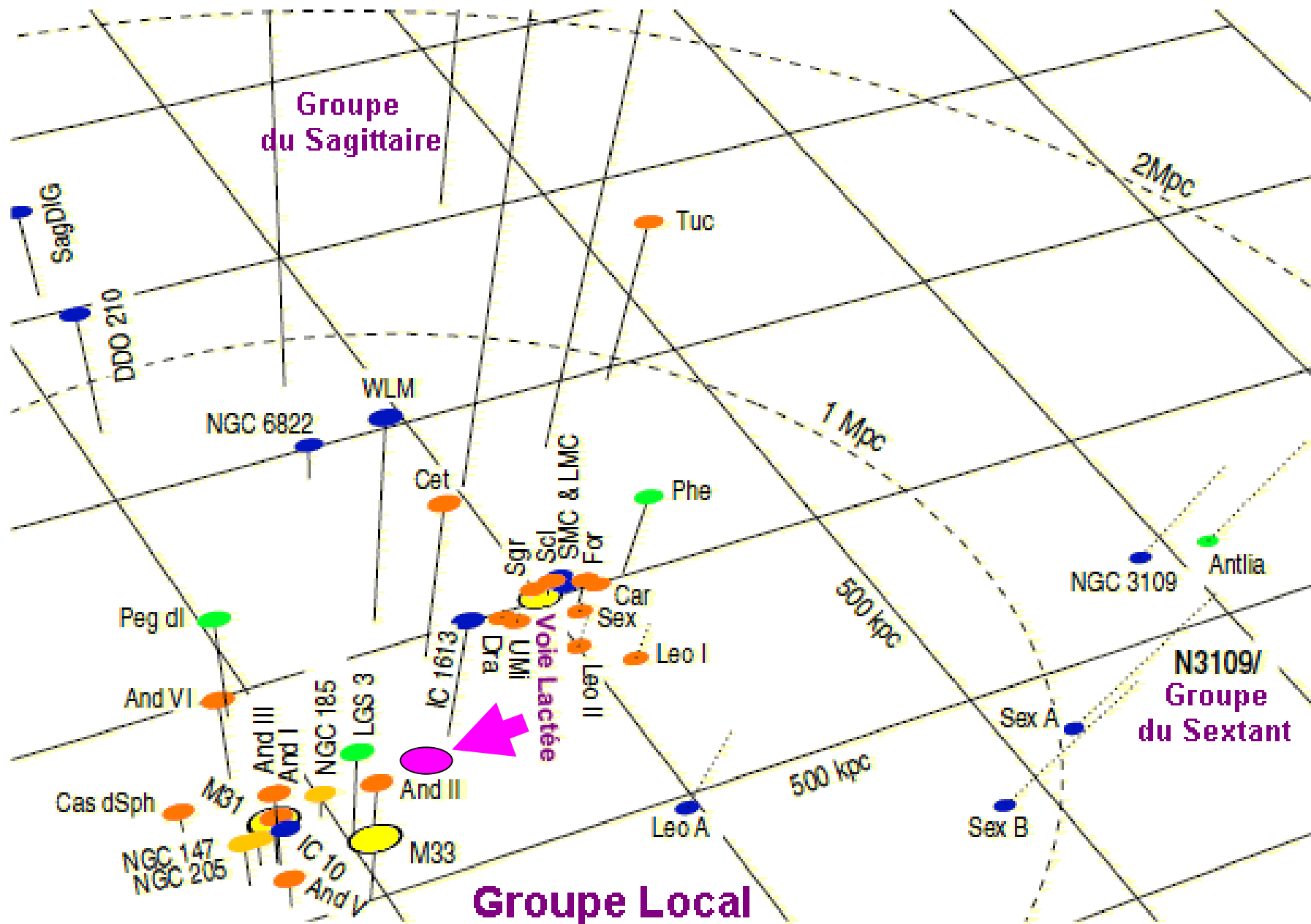
Irrégulières

Type de galaxies



Irrégulières

Groupe local



Groupe local



Grand et petit nuage de Magellan

Groupe local



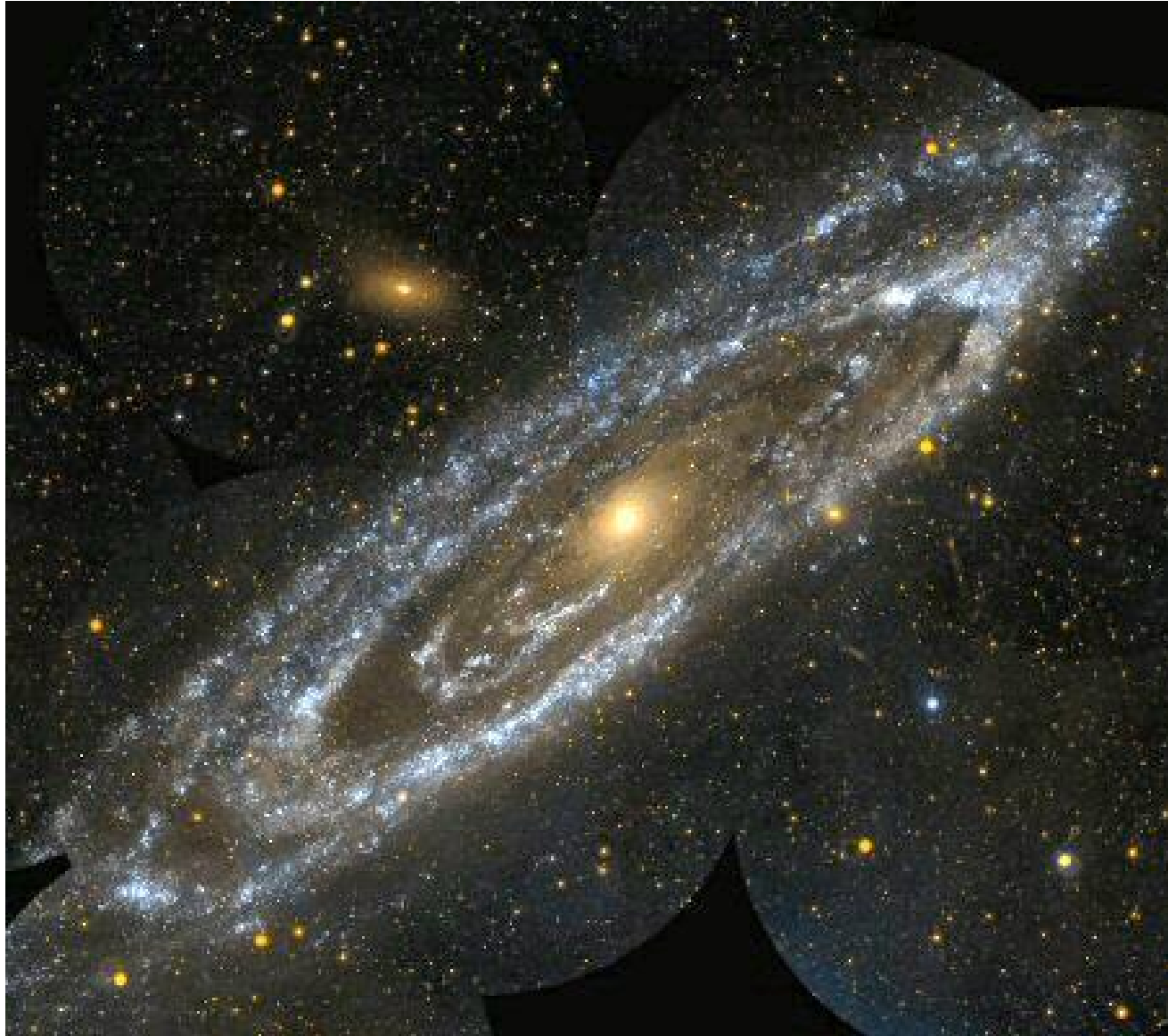
Grand nuage de Magellan

Groupe local



Petit nuage de Magellan

Groupe local



M31 Andromède

Groupe local



M33 Triangle

Groupe local



Leo A - Galaxie irrégulière du Lion

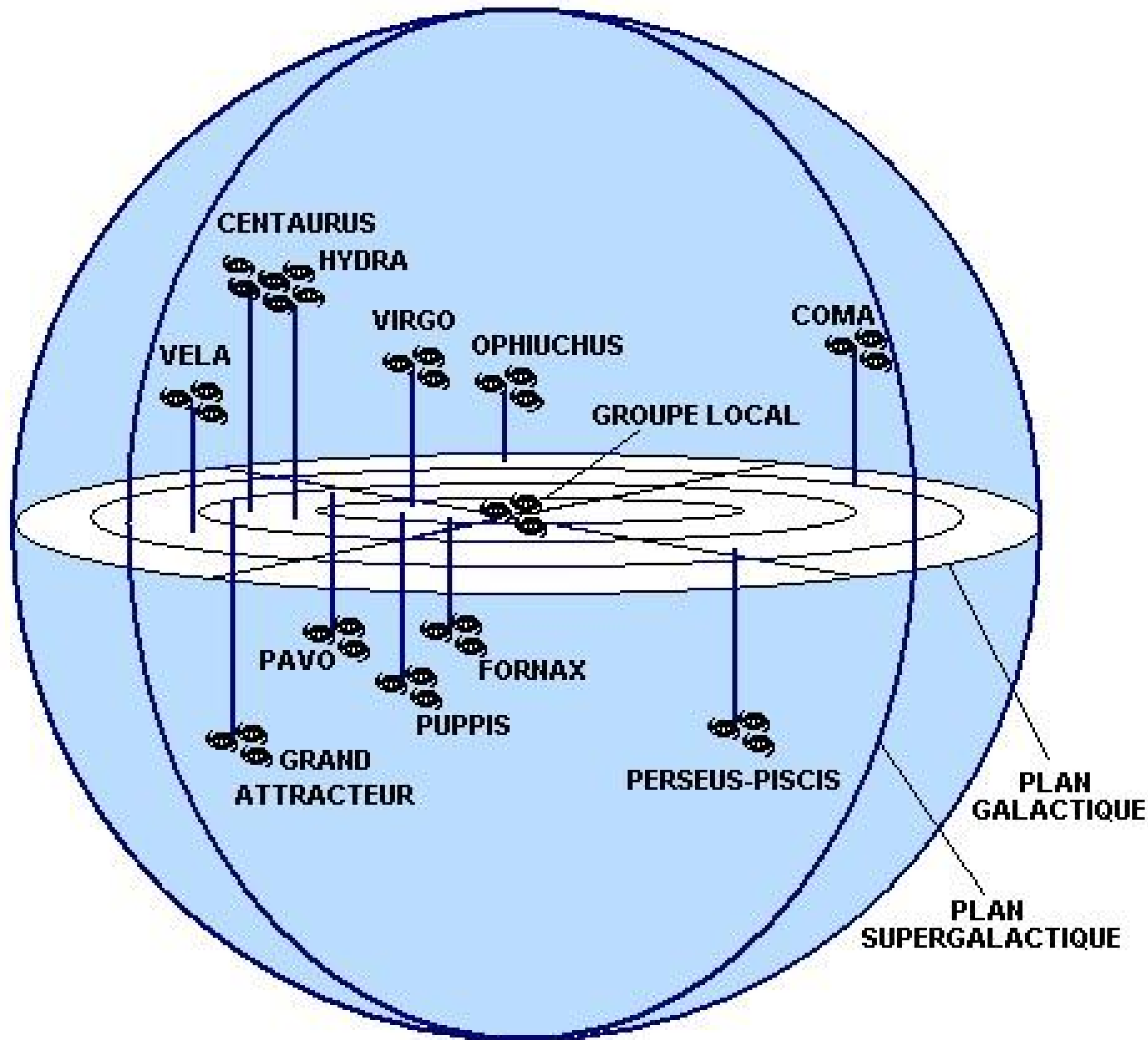
Groupe local



Ceti WLM

Galaxie irrégulière de la Baleine

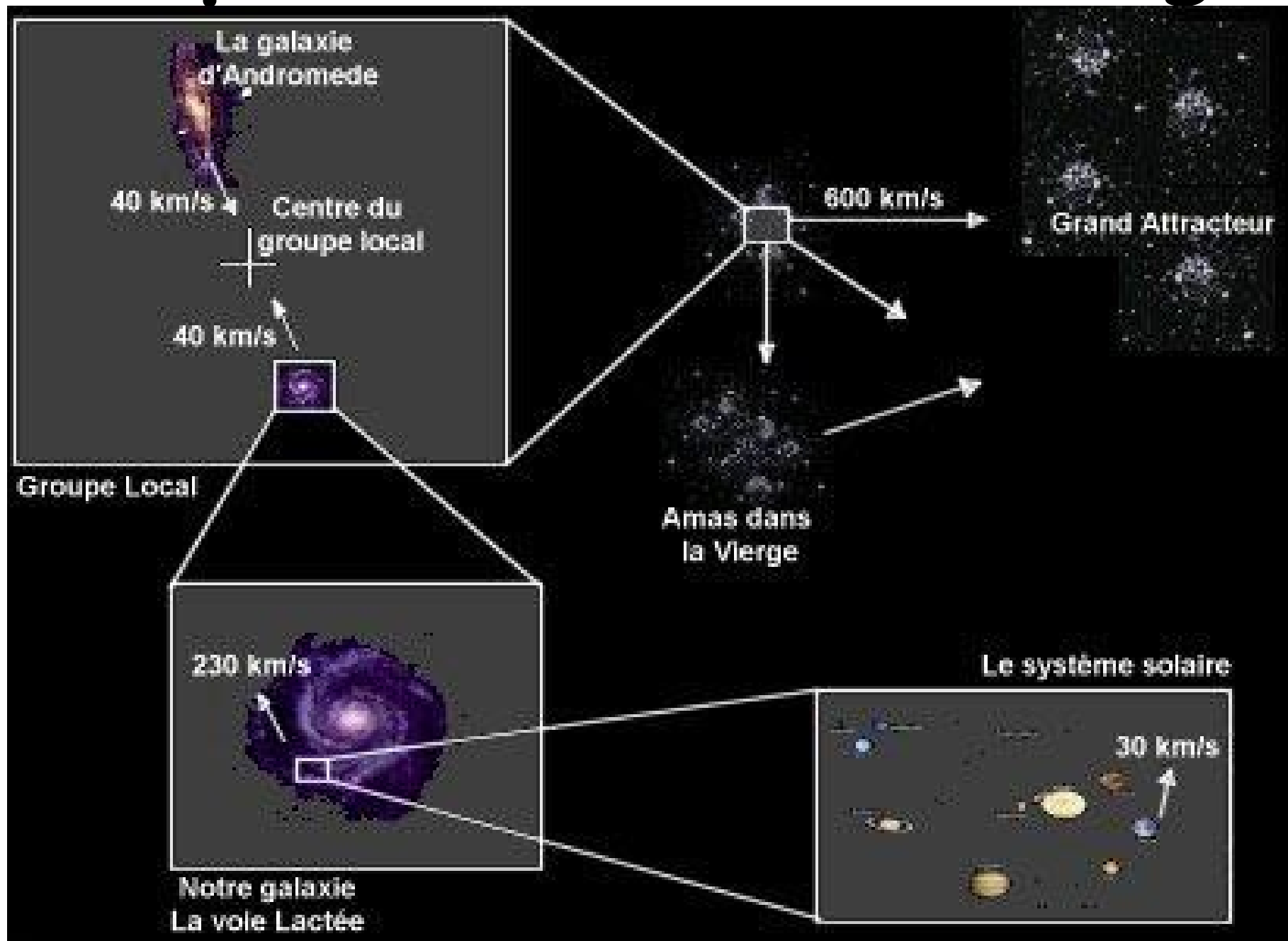
Au delà du Groupe local



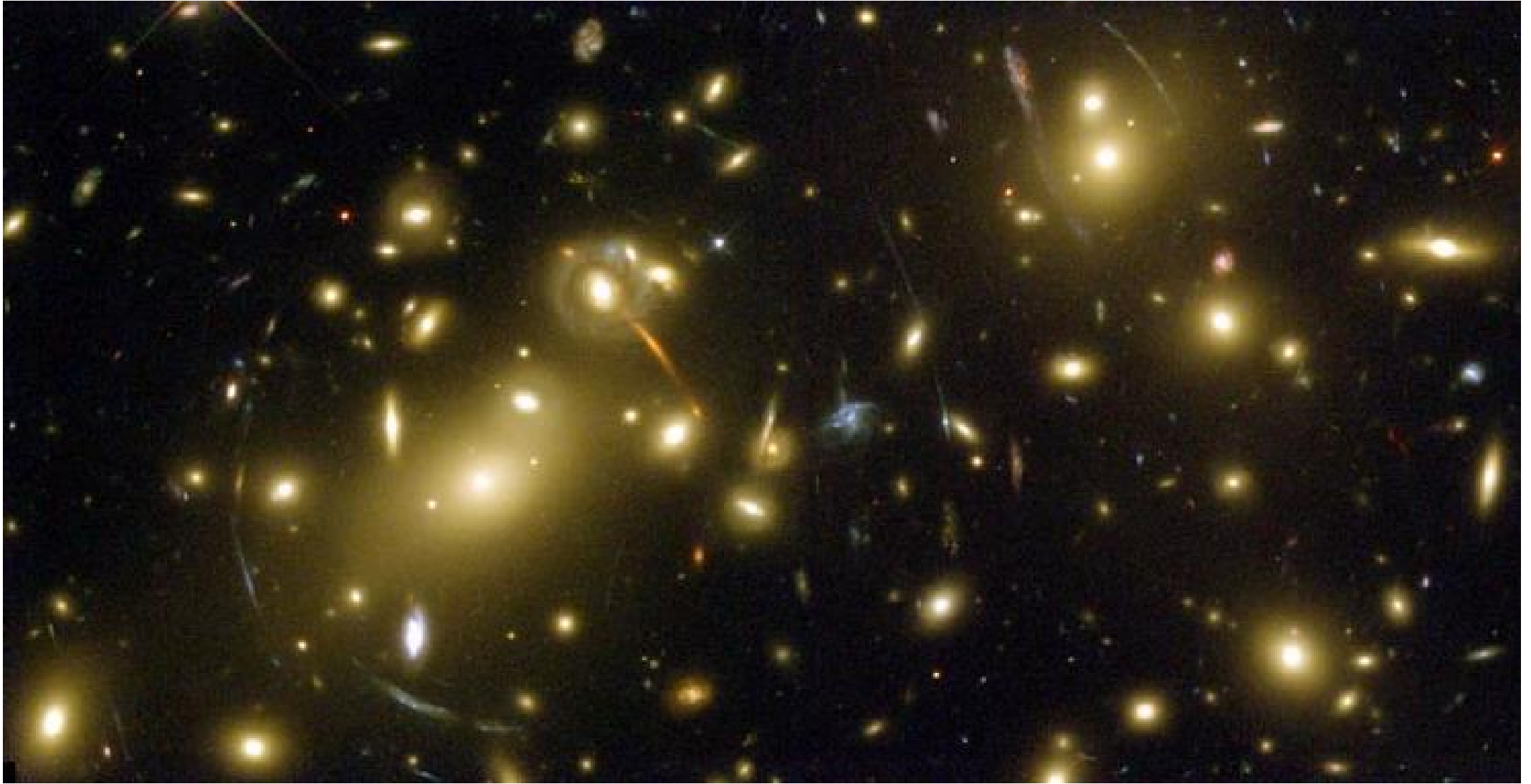
Super amas de la Vierge



Super amas de la Vierge



Dans l'Univers



Des milliards de galaxies

Qu'est-ce que l'Univers

Cosmologie

du Grec Kosmos (Monde)

Etude de la structure,
de l'origine
et l'évolution de l'Univers
et de la place
qu'on y occupe

La Cosmologie

A partir :

- De la théorie de la relativité générale
- Des observations

construit des modèles de
représentation de l'Univers

La Cosmologie

Aujourd'hui tous ces modèles
conduisent à une évolution
de l'Univers de type

Big Bang

La Cosmologie

Quelques différences entre les
différents modèles

Mais tous ces modèles sont de
type Big Bang

La Cosmologie

Objectifs actuels

- Affiner la théorie
- Améliorer et accroître les observations

Pour savoir auquel de ces
modèles correspond notre
Univers

Historiquement

Kosmos de Platon et Aristote

- Monde centré sur la Terre
- Hiérarchisé
- Incluant le système solaire (jusqu'à Saturne)
- Limité par la sphère des fixes

Historiquement

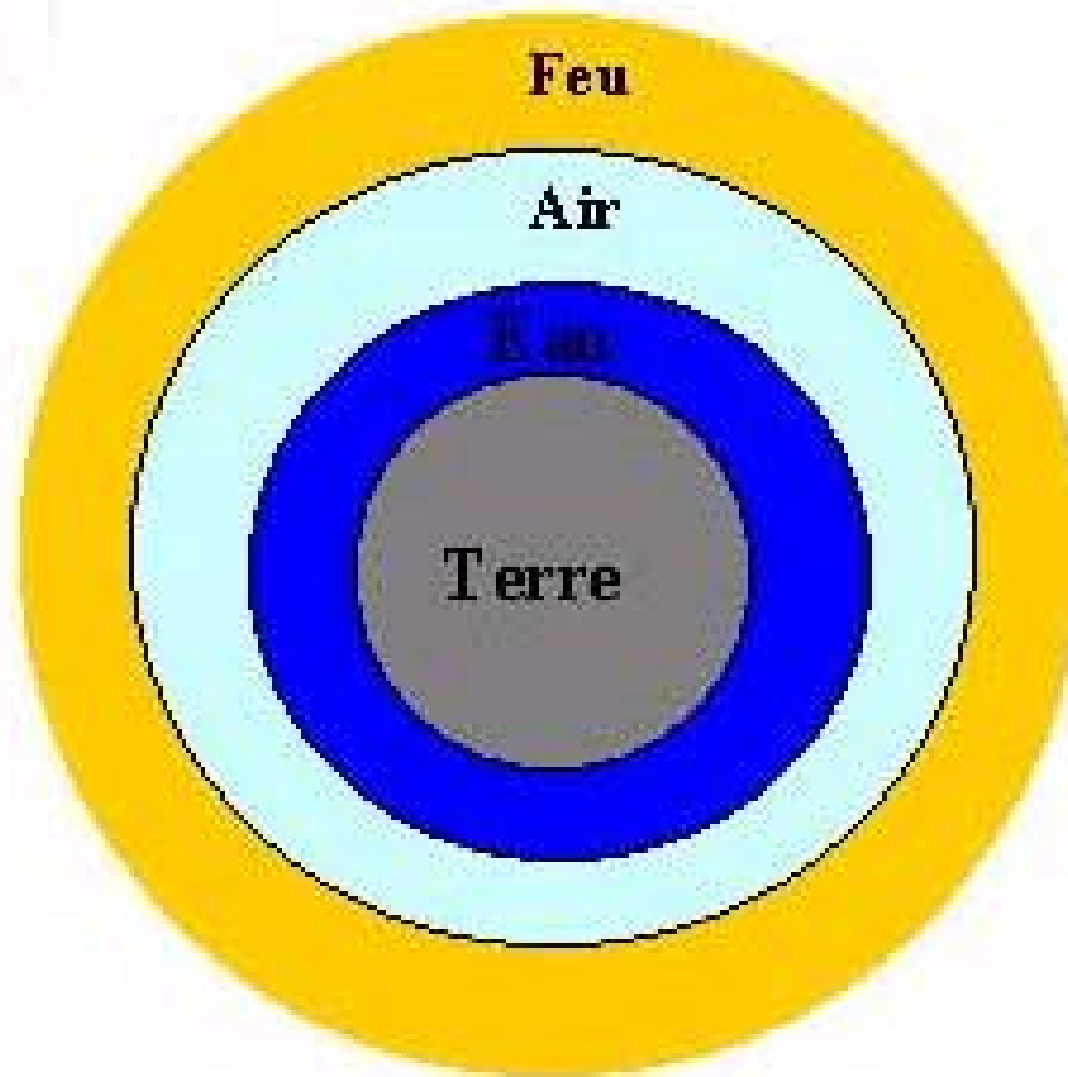
Kosmos de Platon et Aristote

Harmonieux



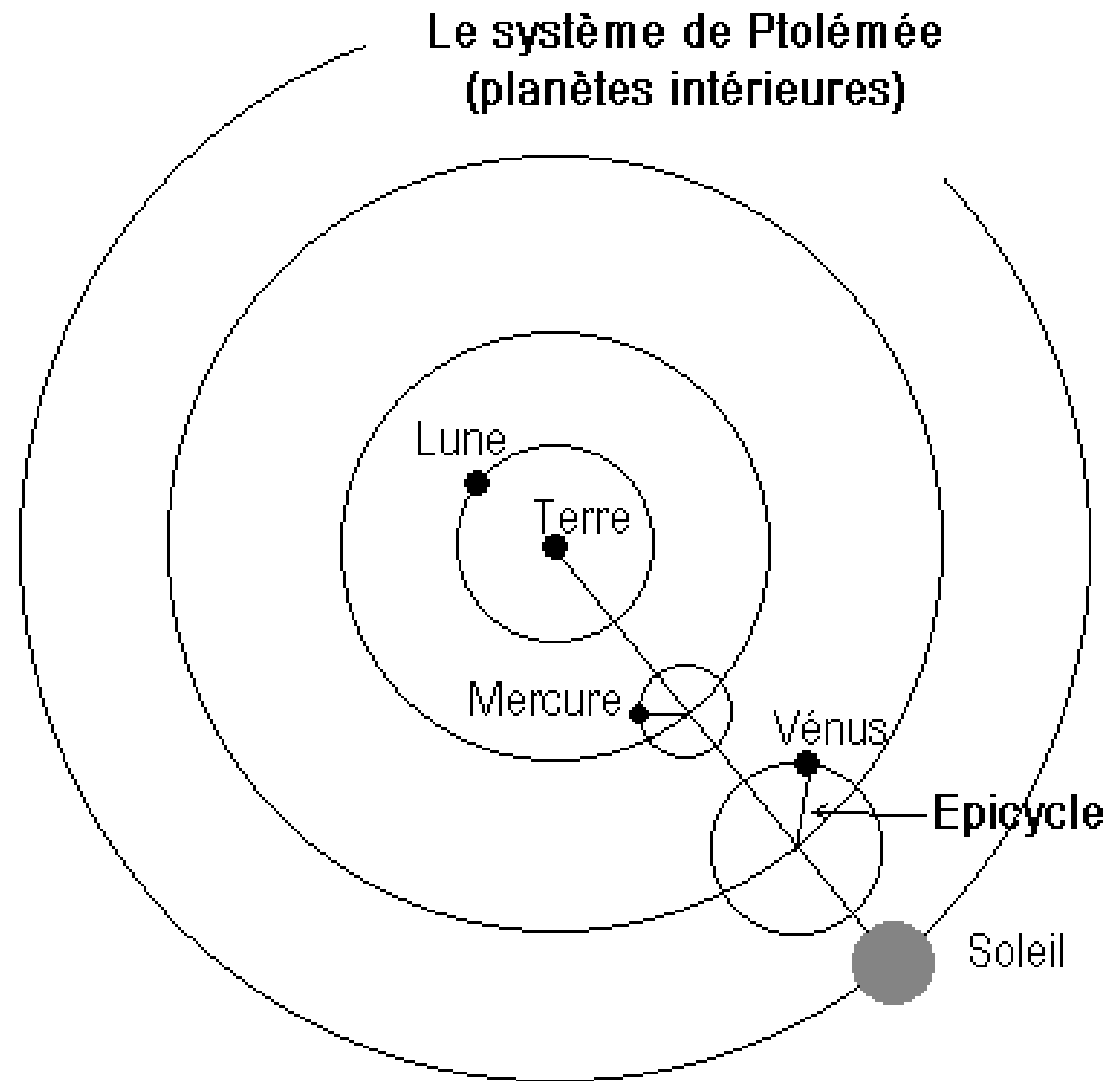
Sphère et cercle

Historiquement



Aristote

Historiquement



Sphère et cercle

1^{ère} révolution cosmologique

Les théoriciens

Copernic
1543



Képler
1600



Newton
1687



1^{ère} révolution cosmologique

L'observateur

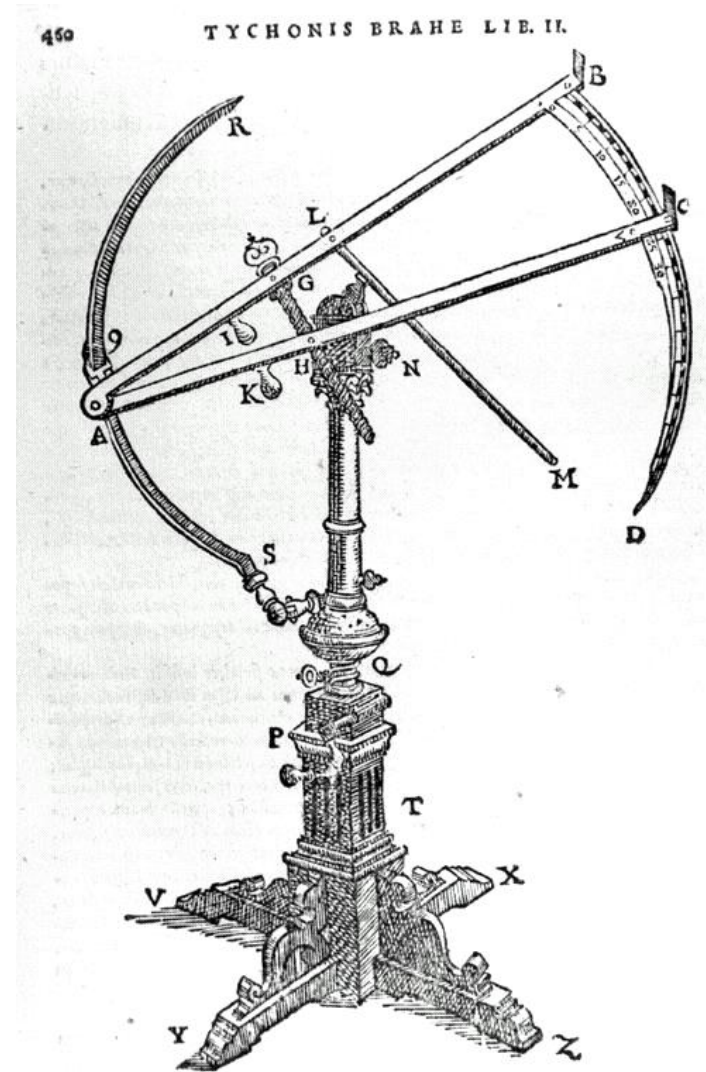
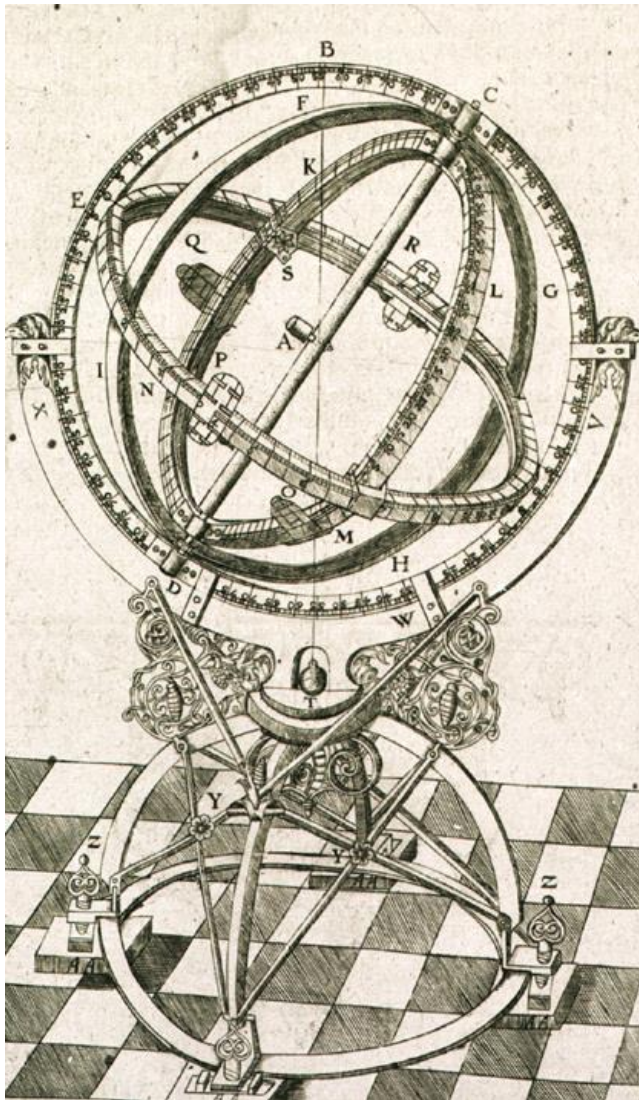
Tycho Brahé

1546 - 1601



1^{ère} révolution cosmologique

Les instruments



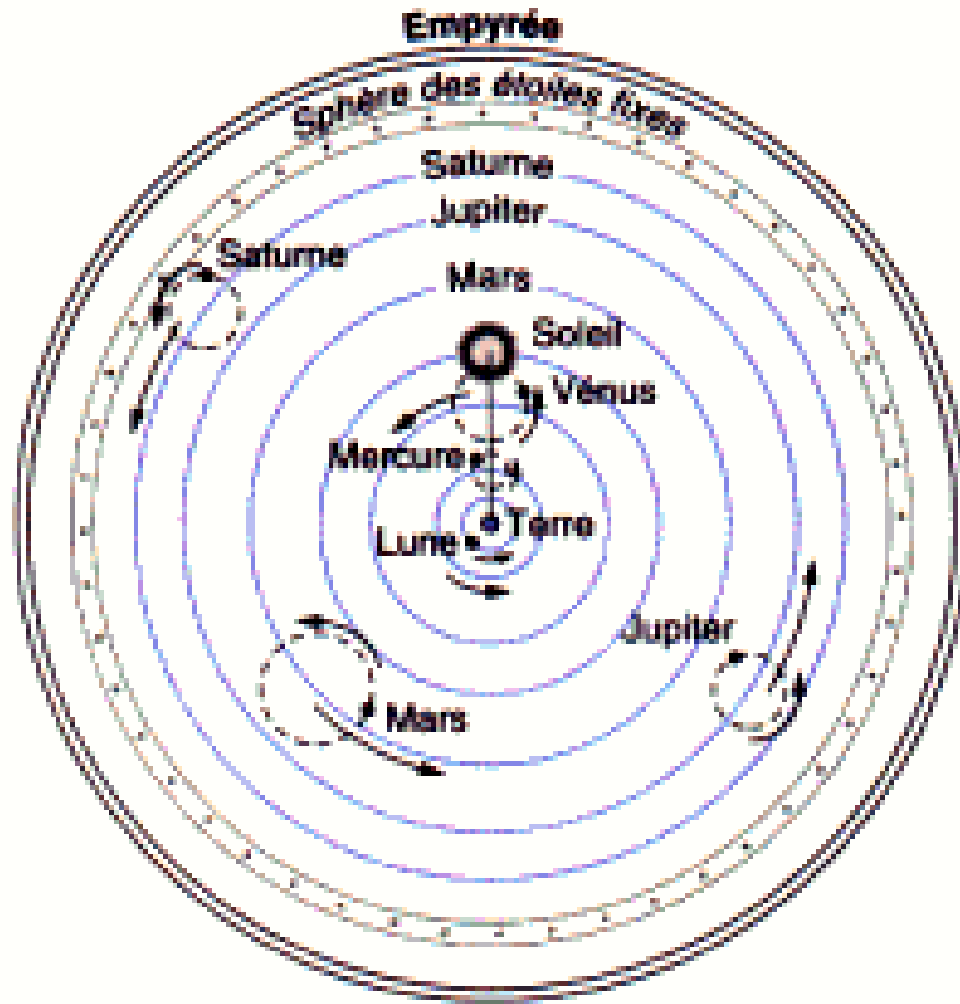
1^{ère} révolution cosmologique

La Terre n'est pas au
centre de l'Univers

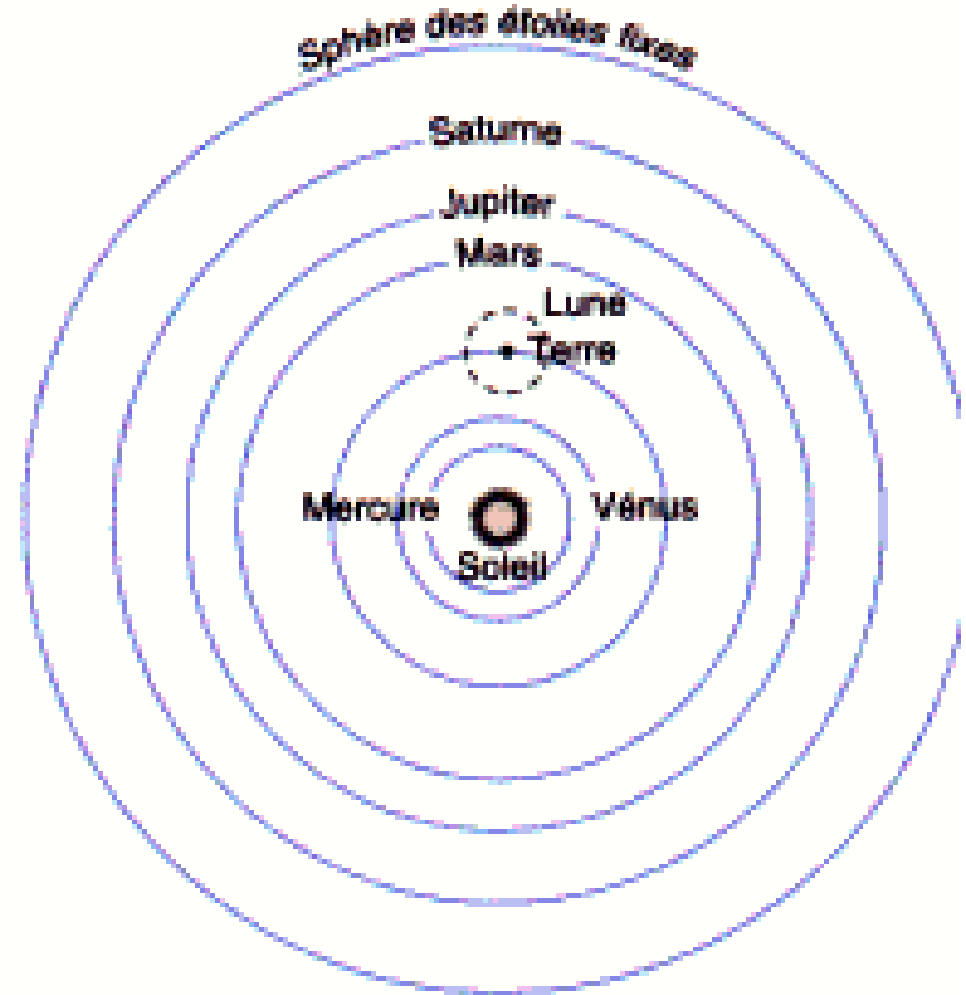
Les planètes ne
décrivent pas des
cercles mais des
ellipses

1^{ère} révolution cosmologique

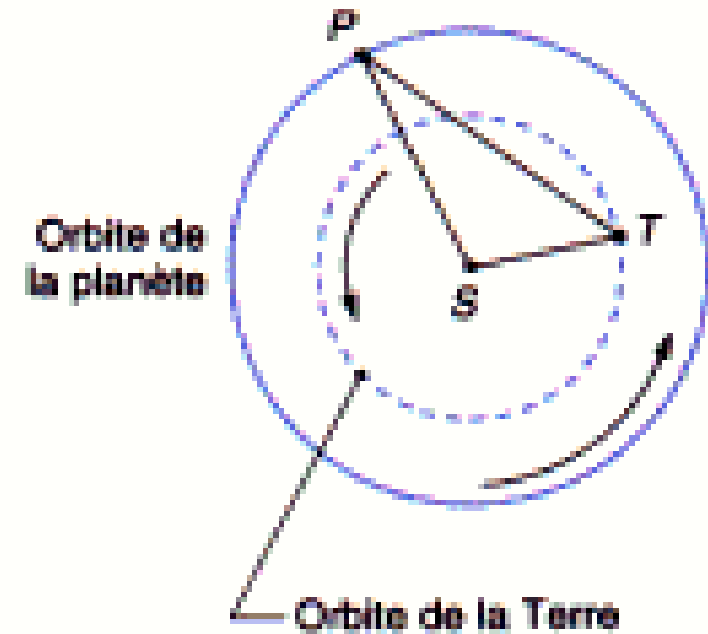
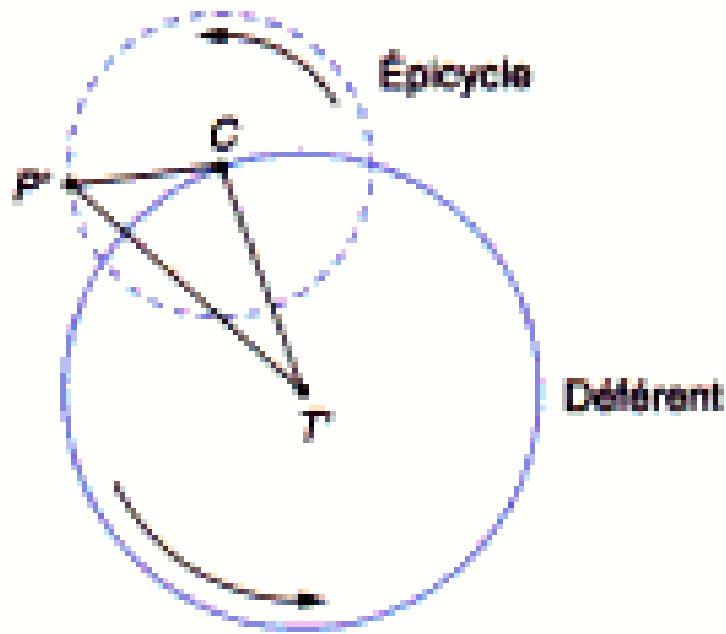
Le système de Ptolémée



Le système de Copernic



1^{ère} révolution cosmologique



1^{ère} révolution cosmologique

Newton

Il n'y a pas de centre
Univers homogène

Il n'y a pas de direction privilégiée
Univers isotrope

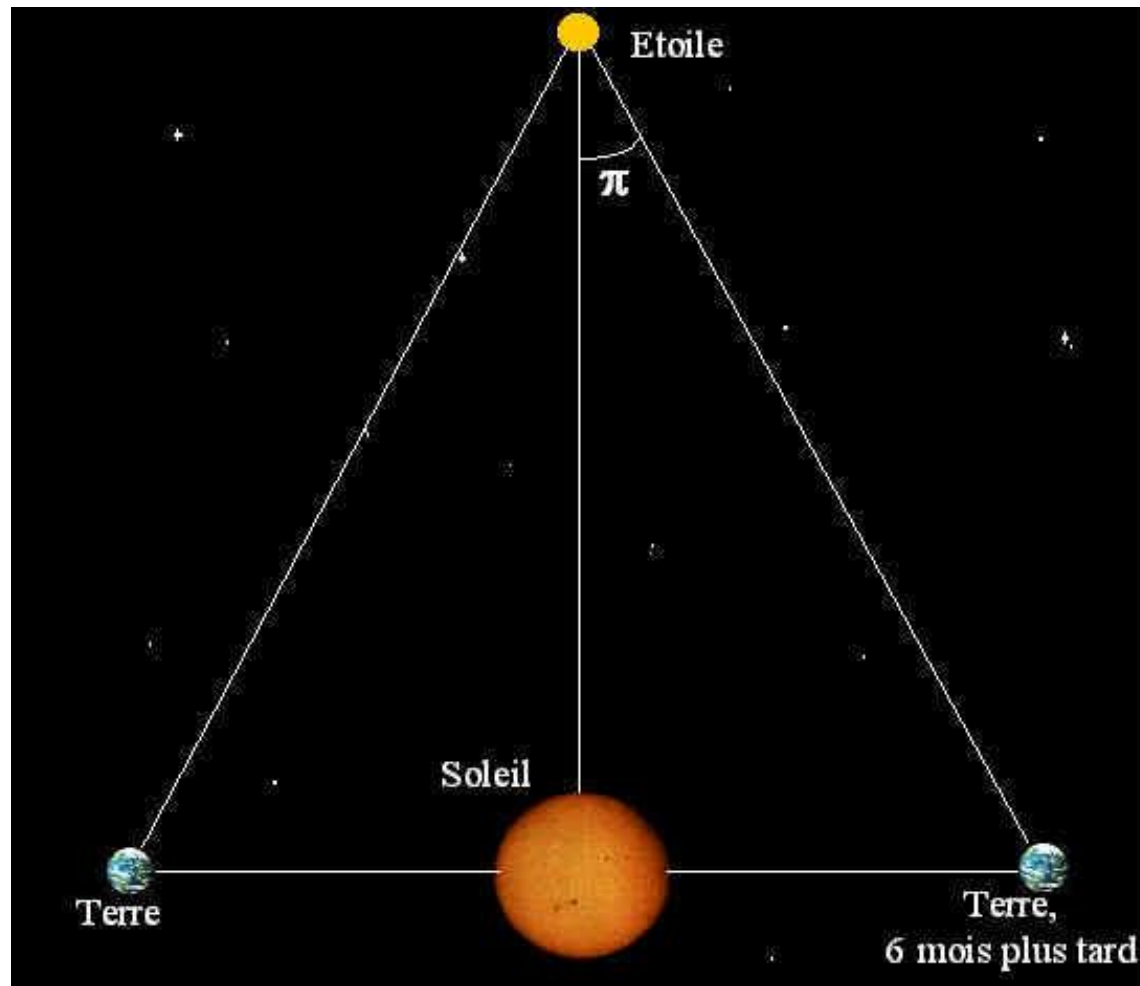
Aujourd'hui ou demain
Univers permanent

1^{ère} révolution cosmologique

Newton

La physique est
universelle et éternelle
Elle s'applique partout
et tout le temps

1^{ère} révolution cosmologique



Au XIX^{ème} siècle
l'Univers est plus vaste que prévu
Mesure de la distance des étoiles

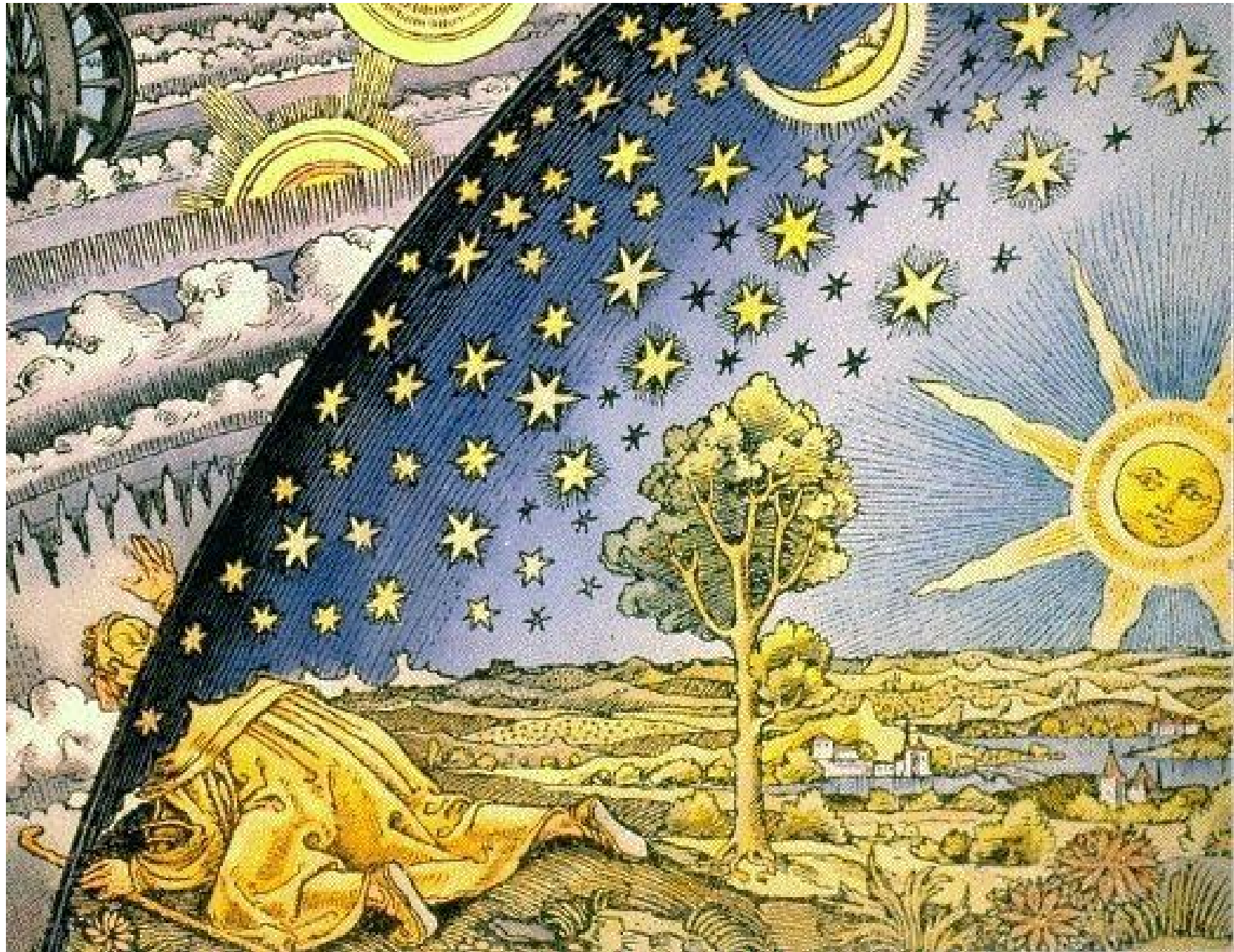
1^{ère} révolution cosmologique

Jusqu'au début du
XX^{ème} siècle

Univers = notre galaxie

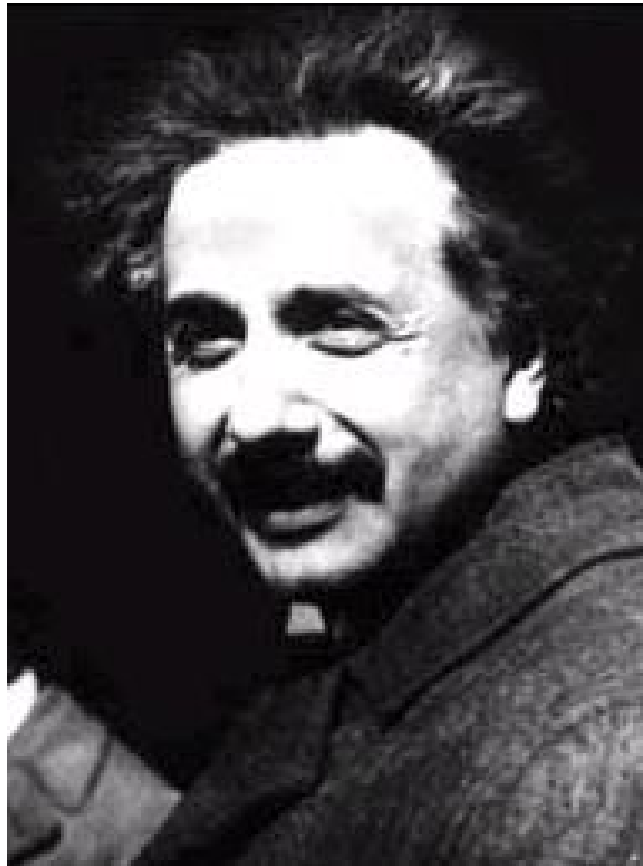


2ème révolution cosmologique



2^{ème} révolution cosmologique

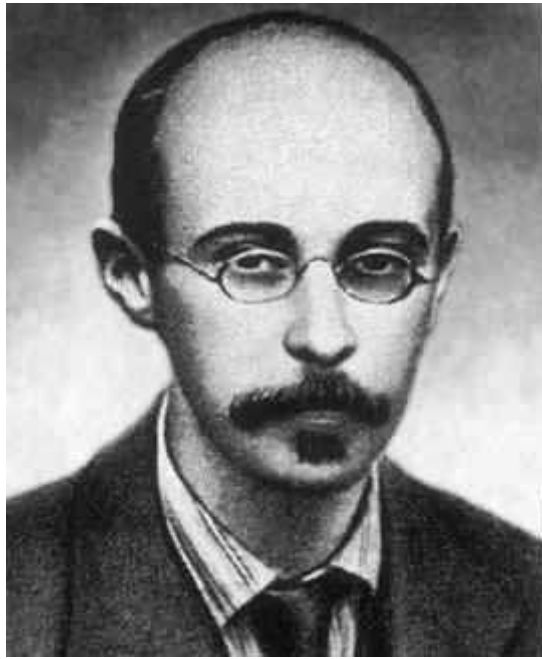
Le théoricien
Albert Einstein



1915 Relativité Générale

2^{ème} révolution cosmologique

Les autres théoriciens



Friedmann



Lemaître



Robertson



Walker

2ème révolution cosmologique

Métrique FLRW → une formulation de la géométrie de l'espace-temps

La métrique dite Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) qui régit l'évolution de l'univers dans ce modèle s'exprime sous la forme :

$$ds^2 = -R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right] + c^2 dt^2$$

où r, θ, ϕ sont les coordonnées polaires, $R(t)$ le facteur d'échelle (positif),
et k vaut $+1, 0$ ou -1 selon la géométrie de l'univers.

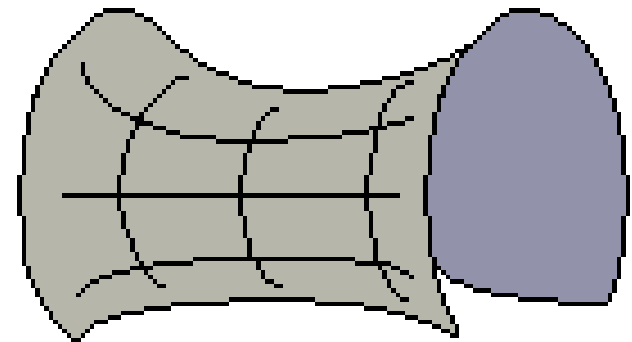
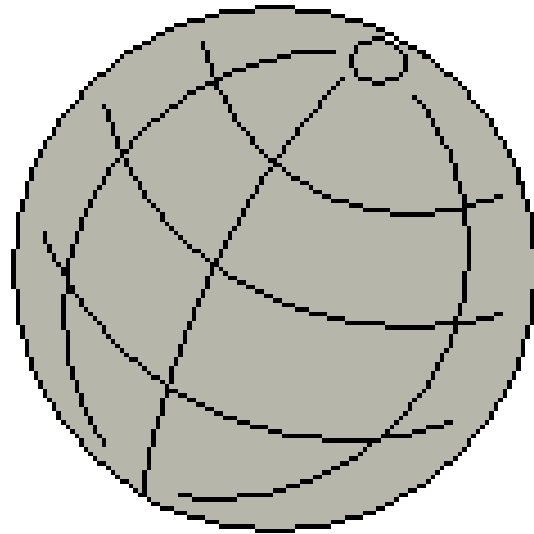
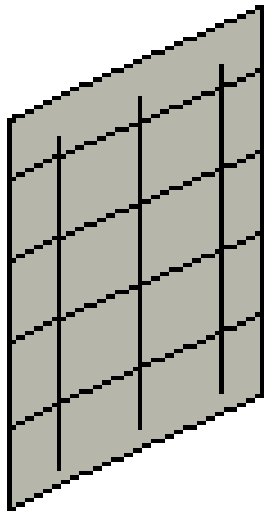
ds^2 → chemin dans un espace à 4 dimensions
3 dimensions de l'espace $r \rightarrow x, y, z$
1 dimension de temps t

Structure de l'Univers

$$S^2 = r^2 - c^2 t^2$$

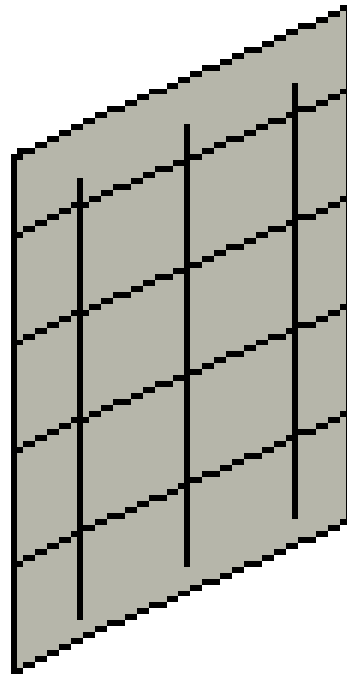
Distance au sens où le long du parcours
d'un rayon lumineux $s = 0$

Structure de l'Univers



Topologie de l'espace

Structure de l'Univers



$k = 0$ Modèle euclidien

$$ds^2 = -R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right] + c^2 dt^2$$

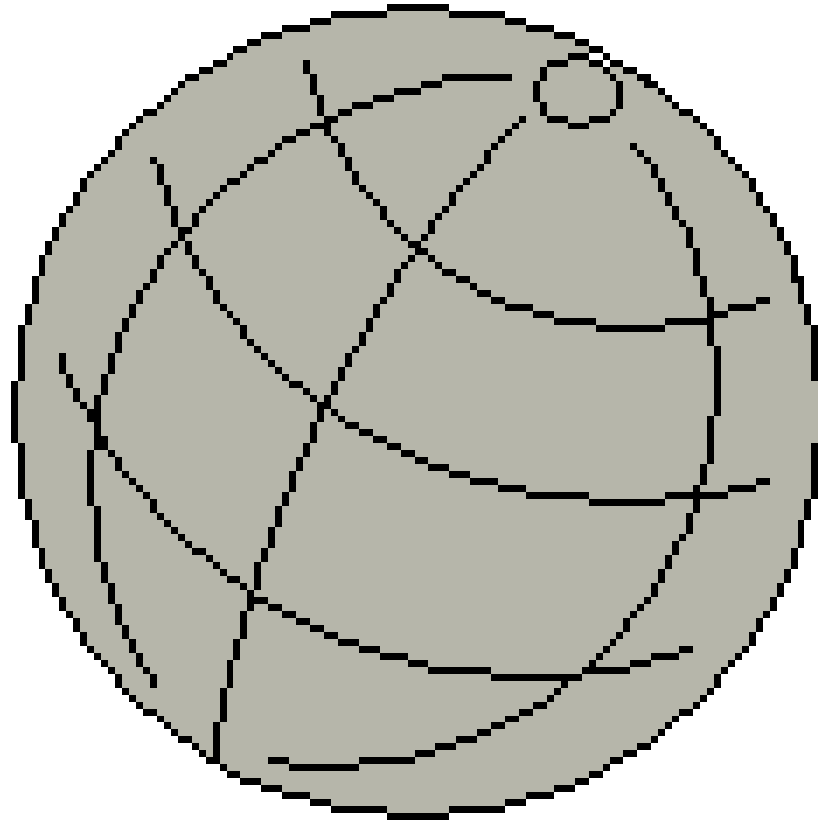
**et si $R = 1 \rightarrow$ Espace de Minkowski
de la relativité restreinte**

Structure de l'Univers

- 2 parallèles ne se rejoignent jamais
- Surface d'une sphère $4\pi r^2$
- Volume d'une sphère $\frac{4}{3} \pi r^3$
- 10 variantes infinies
- 8 variantes finies (dont cylindre et tore)

Modèle euclidien

Structure de l'Univers



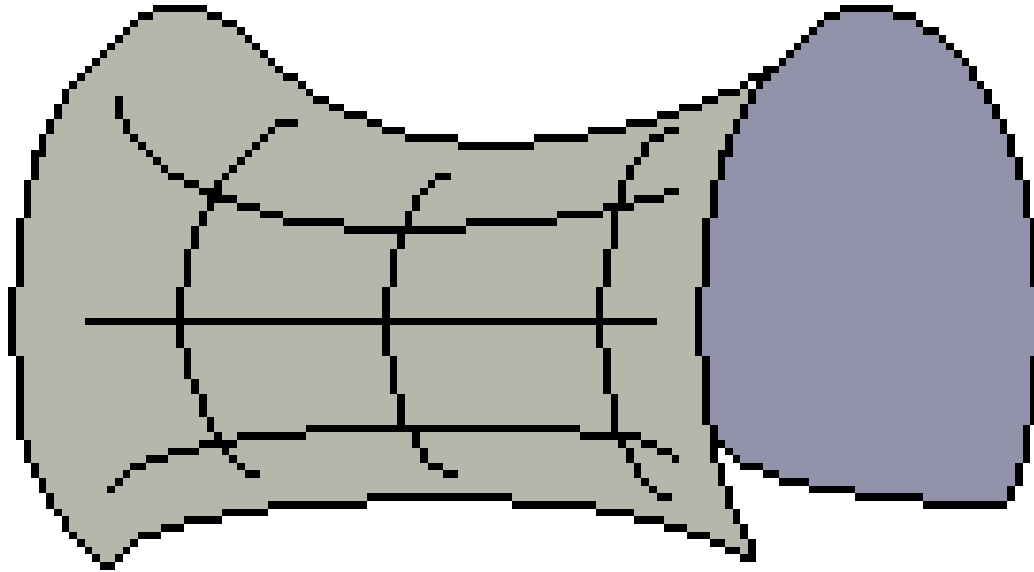
$k = 1$ Modèle sphérique

Structure de l'Univers

- 2 parallèles se croisent à une distance dépendant du rayon de courbure
- Surface d'une sphère $< 4\pi r^2$
- Volume d'une sphère $< \frac{4}{3} \pi r^3$
- Une infinité de forme finies mais sans limites

Modèle sphérique

Structure de l'Univers



$k = -1$ Modèle hyperbolique

Structure de l'Univers

- 2 parallèles se croisent à une distance dépendant du rayon de courbure (< 0)
- Surface d'une sphère $> 4\pi r^2$
- Volume d'une sphère $> \frac{4}{3} \pi r^3$
- Une infinité de forme infinies

Modèle hyperbolique

Structure de l'Univers

$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho$$

Einstein pose cette métrique dans le cadre de la Relativité Générale

Structure de l'Univers

$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho$$



Courbure
du temps



Courbure
de l'espace

Structure de l'Univers

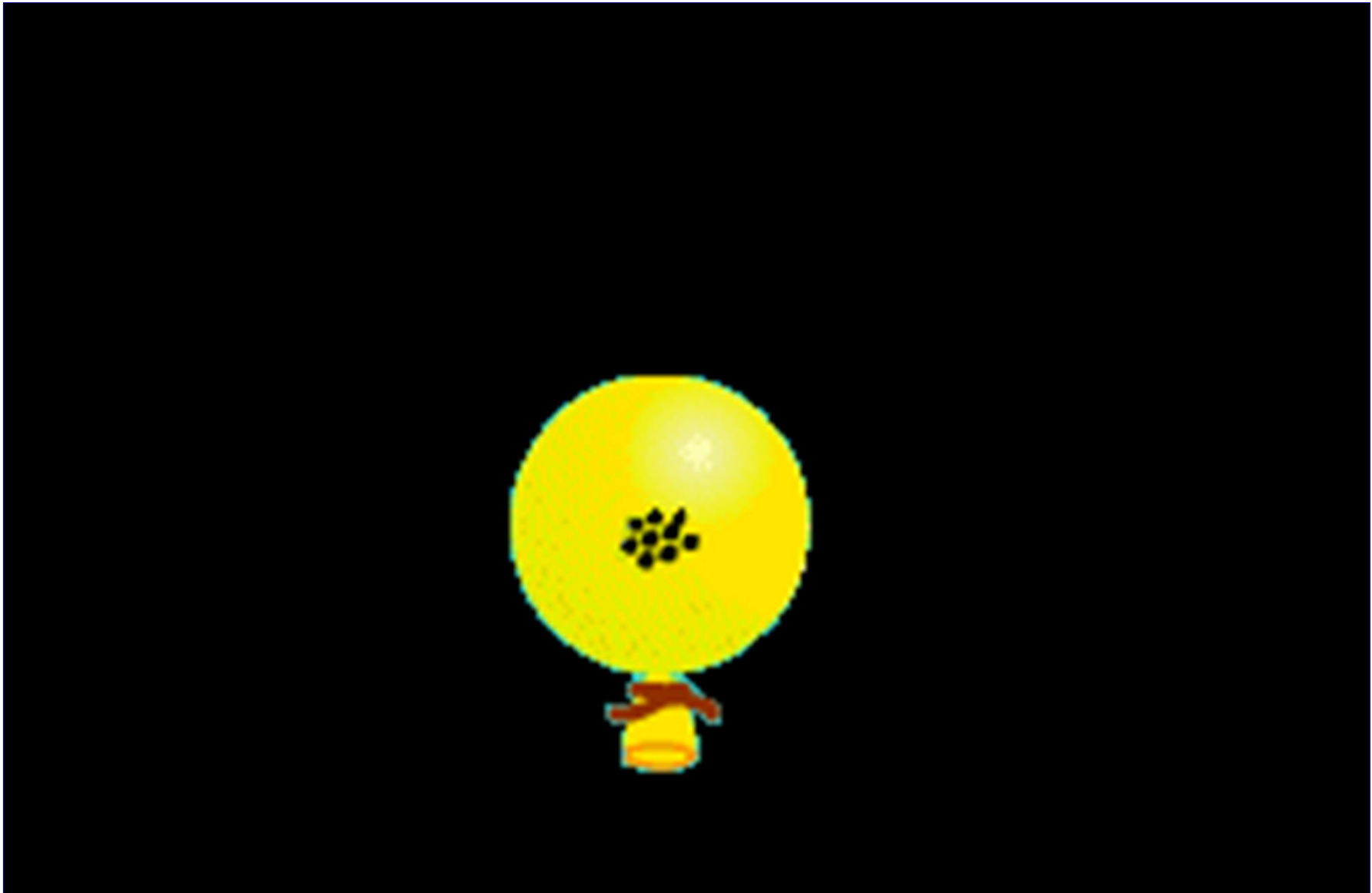
$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho$$

Cette équation est dynamique en R
(facteur d'échelle)



L'Univers (espace-temps) doit se
dilater ou se contracter

Structure de l'Univers



L'Univers n'est pas statique

Structure de l'Univers

$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho + \frac{\Lambda}{3}$$



Einstein ajoute une constante Λ
dite constante cosmologique telle
que $dR/dt = 0$
pour que l'Univers
soit statique

2^{ème} révolution cosmologique

Mais les observateurs débarquent



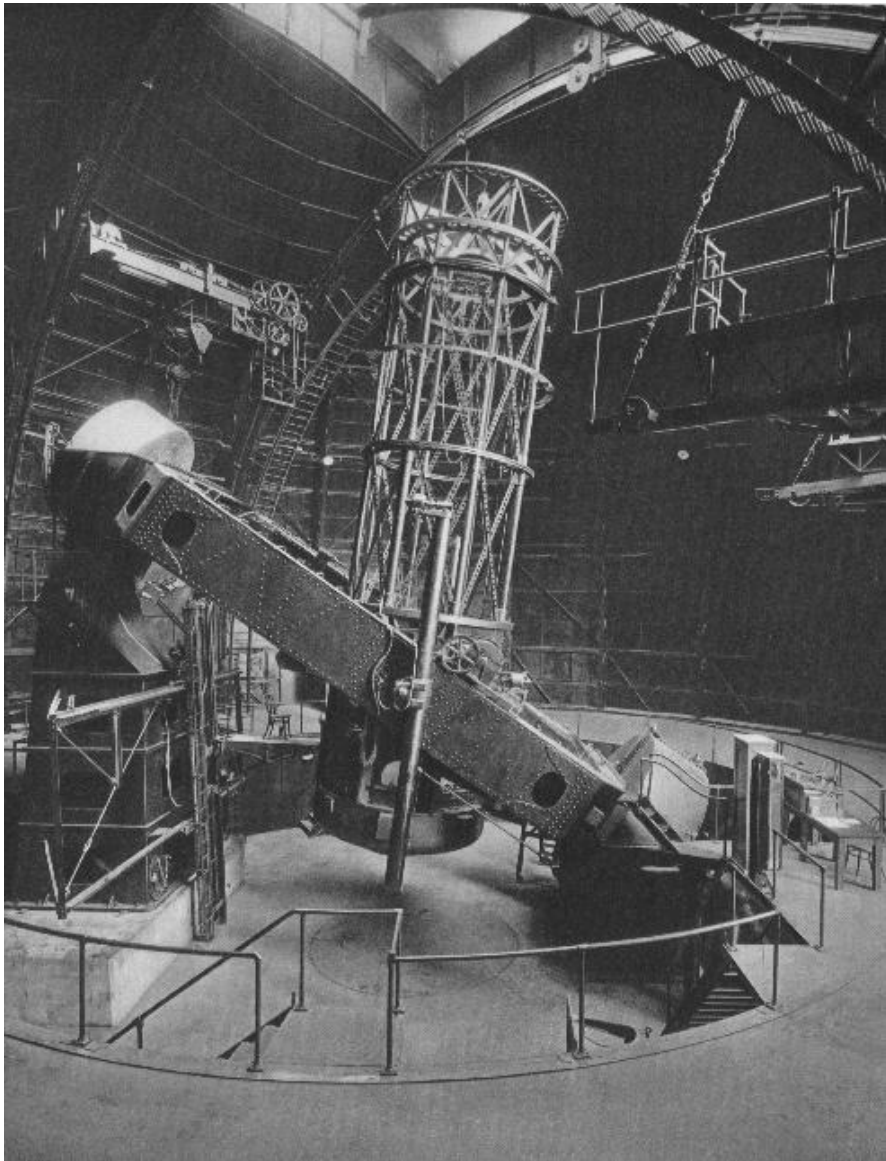
Vesto Slipher
1875-1969



Edwin Hubble
1889-1953

2^{ème} révolution cosmologique

Les instruments



En 1917
Télescope de 2,50 m
du Mont Wilson
et son spectromètre

2^{ème} révolution cosmologique

En 1924

Edwin Hubble montre que
la nébuleuse d'Andromède
est une galaxie,
en dehors de notre galaxie

2^{ème} révolution cosmologique



2,4 millions d'années-lumières

2^{ème} révolution cosmologique

1929 Slipher et Hubble montrent
que toutes les galaxies sont en
mouvement et s'éloignent

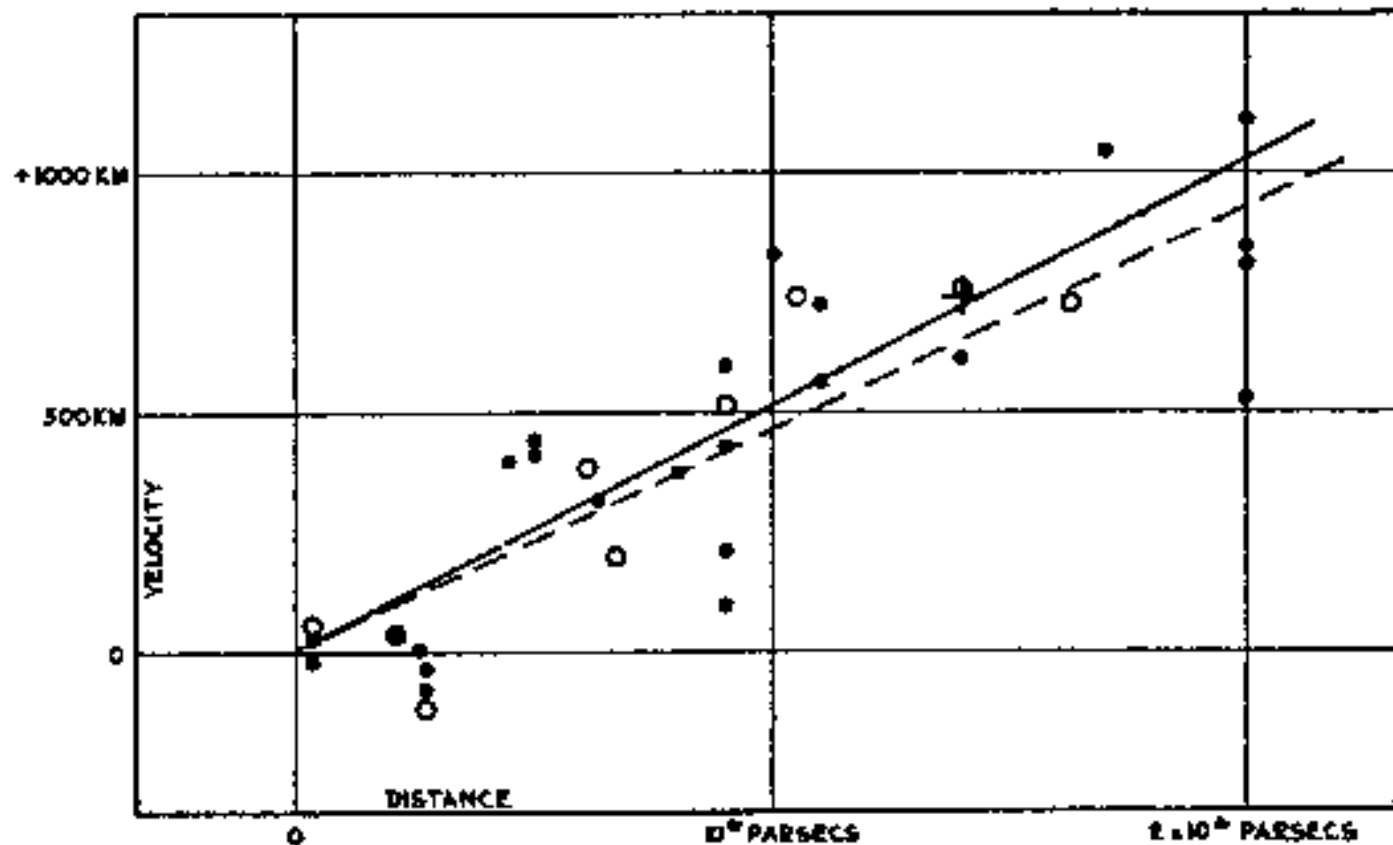
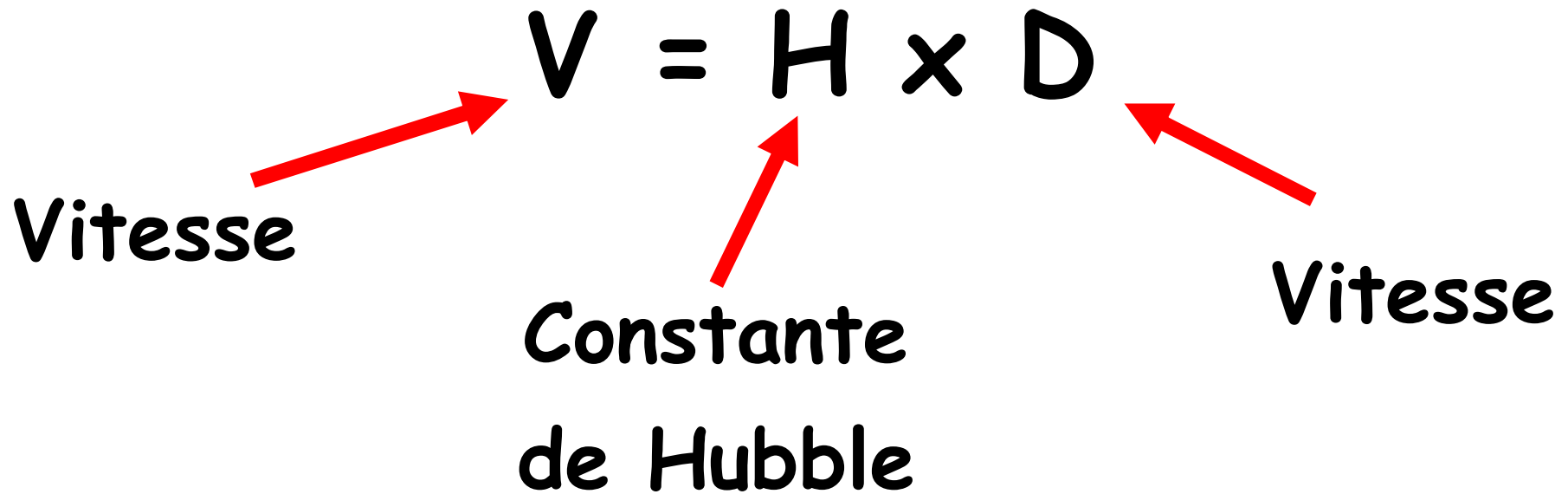


FIGURE 1

2ème révolution cosmologique



The diagram shows the equation $V = H \times D$ in the center. Three red arrows point from labels below to the variables in the equation: one from 'Vitesse' to 'V', one from 'Constante de Hubble' to 'H', and one from 'Vitesse' to 'D'.

$$V = H \times D$$

Vitesse

Constante
de Hubble

Vitesse

Loi de Hubble

Structure de l'Univers

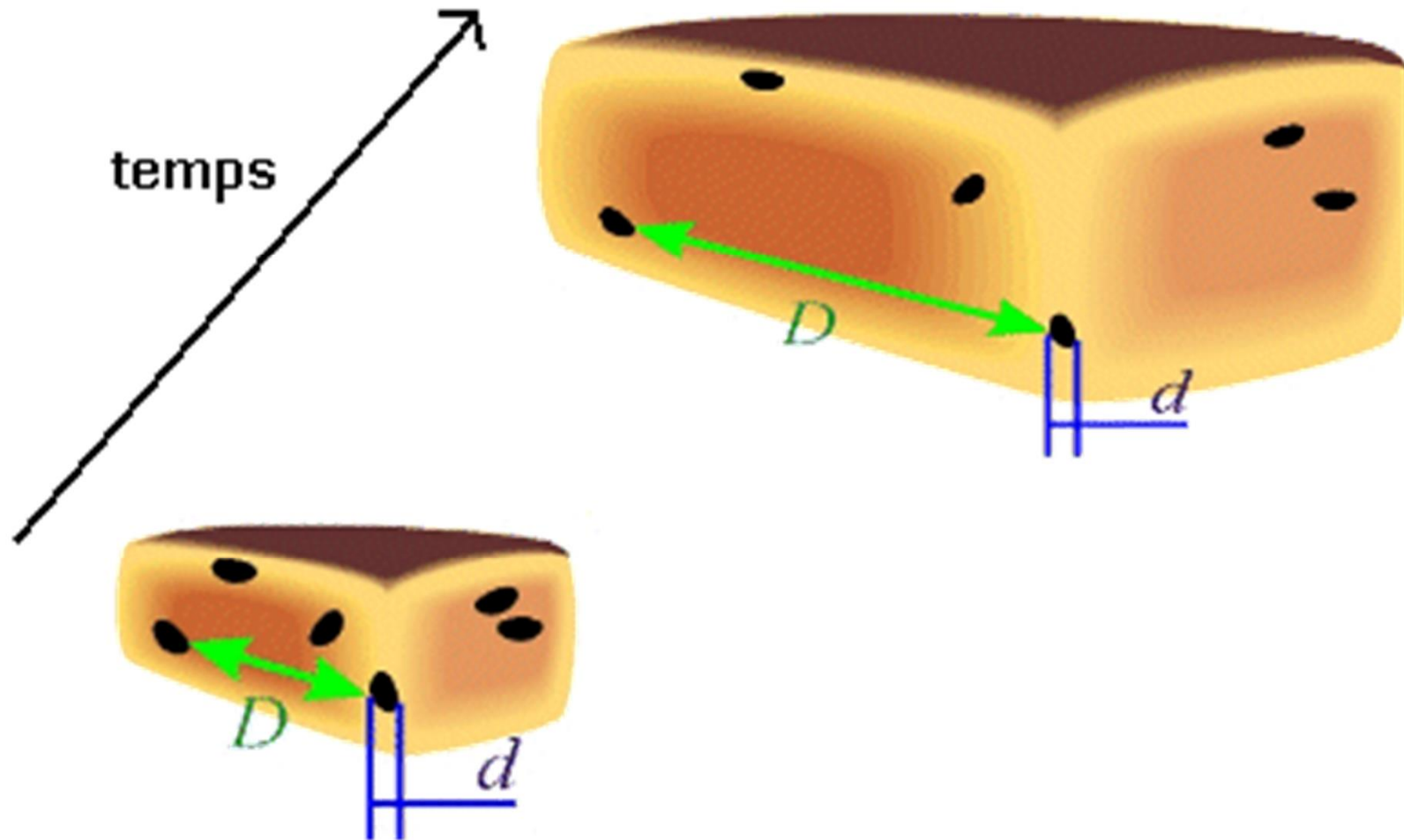
$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho + \frac{\Lambda}{3}$$

Oui

mais pas telle
que $dR/dt = 0$

Einstein se reproche d'avoir introduit la
constante cosmologique

Expansion de l'Univers



Raisins dans le Kugelhopf

Les modèles



Fred Hoyle



George Gamow

**Deux modèles compatibles avec la fuite
des galaxies**

Les modèles



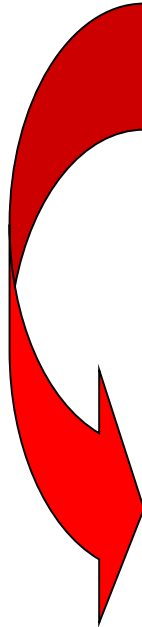
Fred HOYLE : Théorie de l'état quasi-stationnaire
Création de matière continue qui explique la fuite des galaxies



George GAMOW : Les particules et les éléments sont nés grâce à la haute température d'une explosion originale

Les modèles

HOYLE
donne le
nom de
Big Bang
au
modèle
de
GAMOW

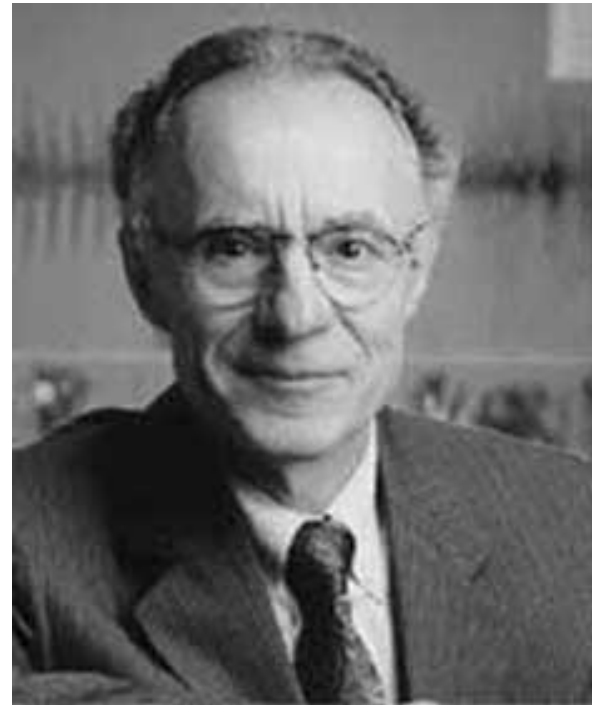


Les modèles

En 1964, 2 ingénieurs de Bell Phone font des essais d'une antenne satellite

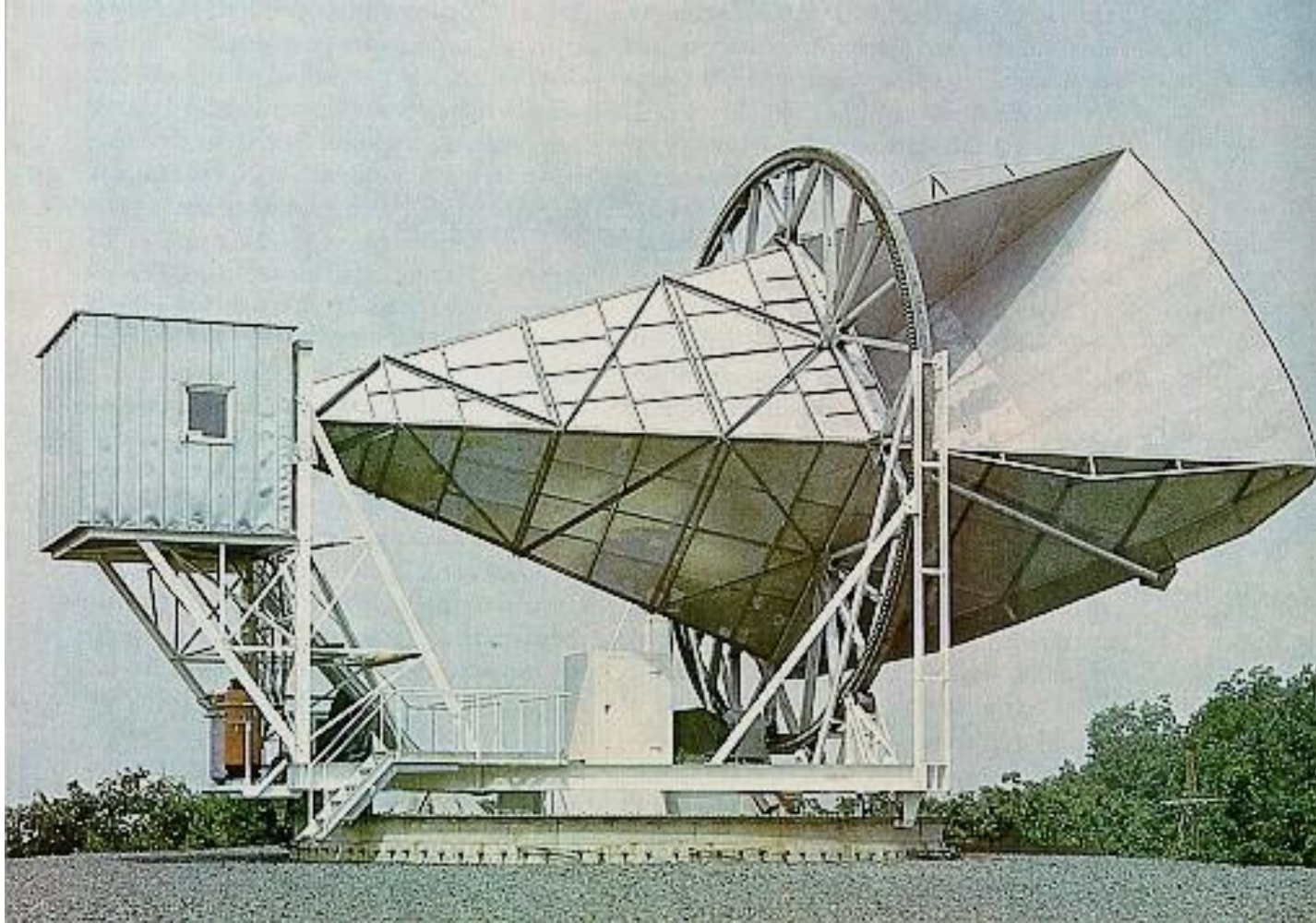


**Robert
Wilson**



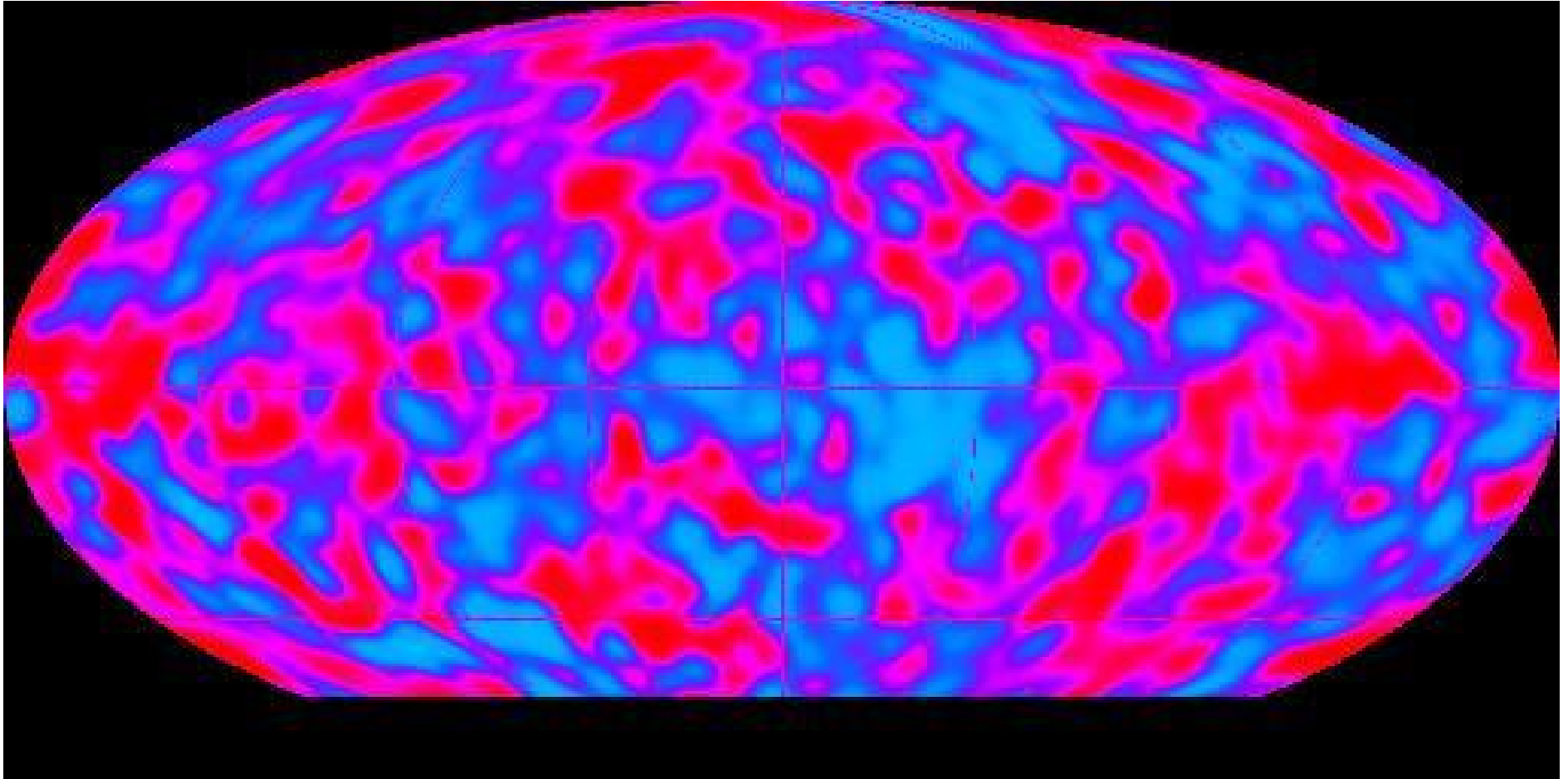
**Arno
Penzias**

Les modèles



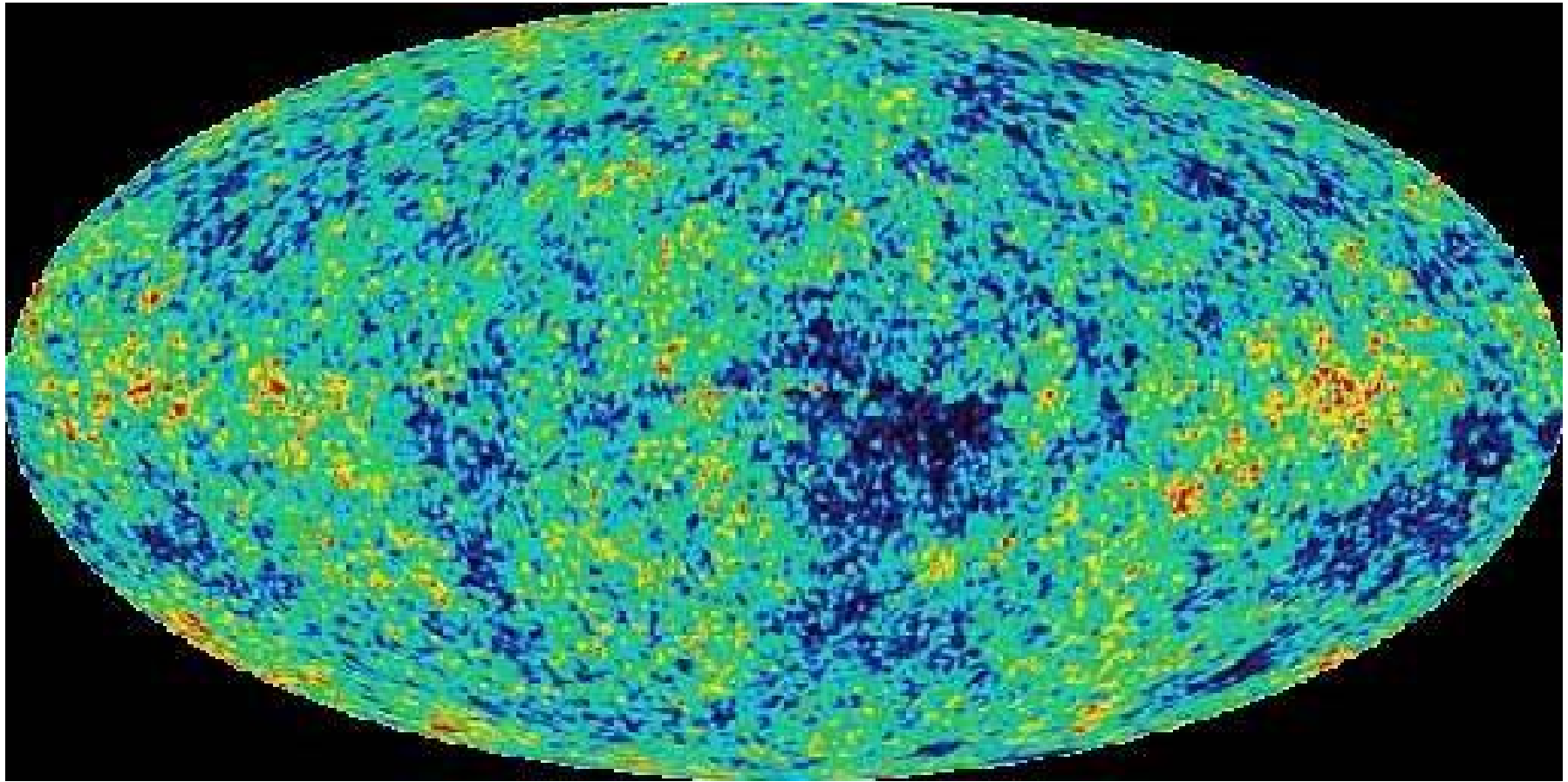
**Il découvre un rayonnement isotrope
venant de toutes les direction de
l'Univers**

Fond diffus cosmologique



Prévu par la théorie du Big Bang
Résidu de rayonnement du moment où
l'Univers était très chaud et très petit

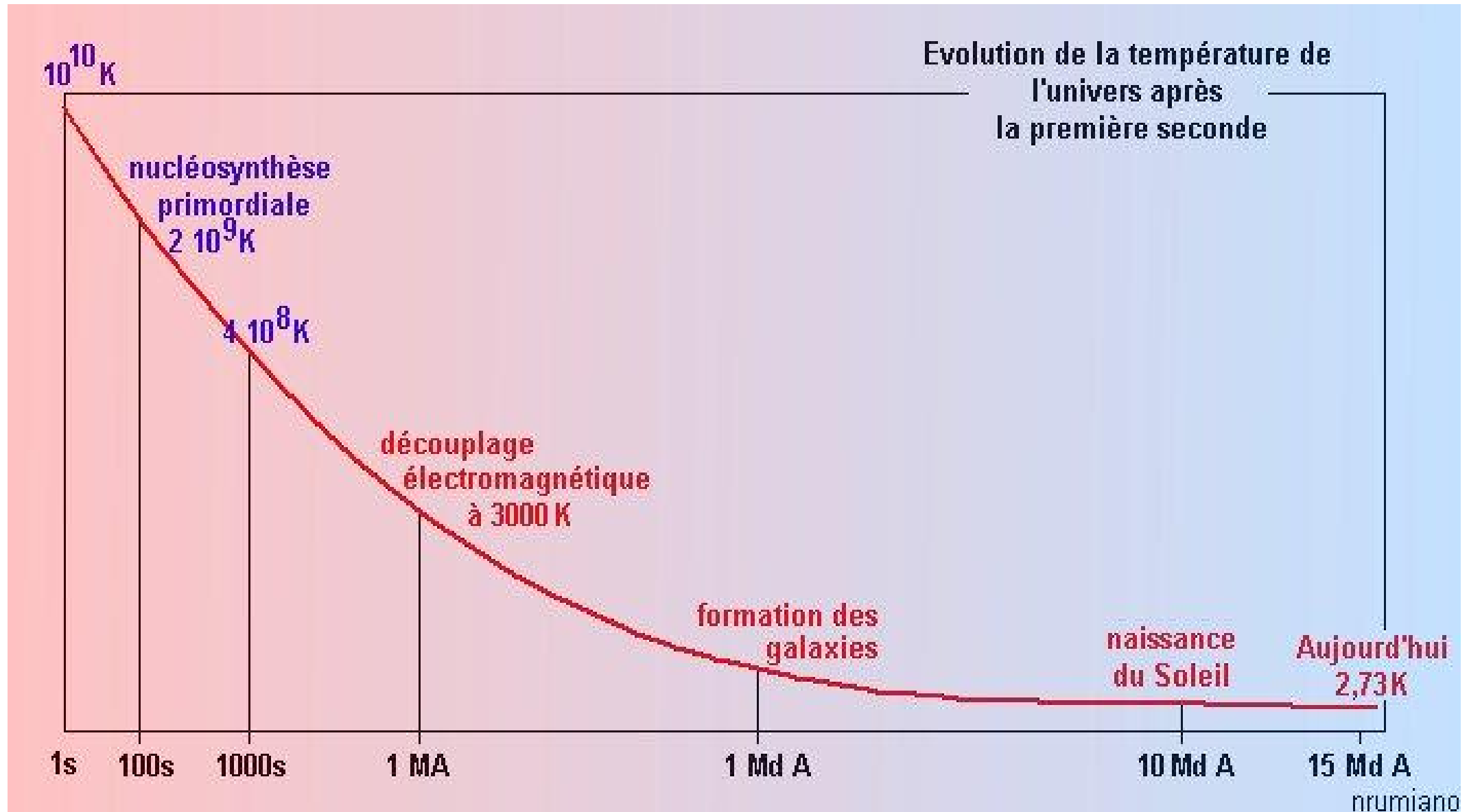
Fond diffus cosmologique



2,73K

1/30.000^{ème} de K d'écart entre les zones les plus chaudes et les plus froides = homogène

Fond diffus cosmologique



Nucléosynthèse primordiale

Deutérium



Hélium-3



Hélium-4



Lithium-7



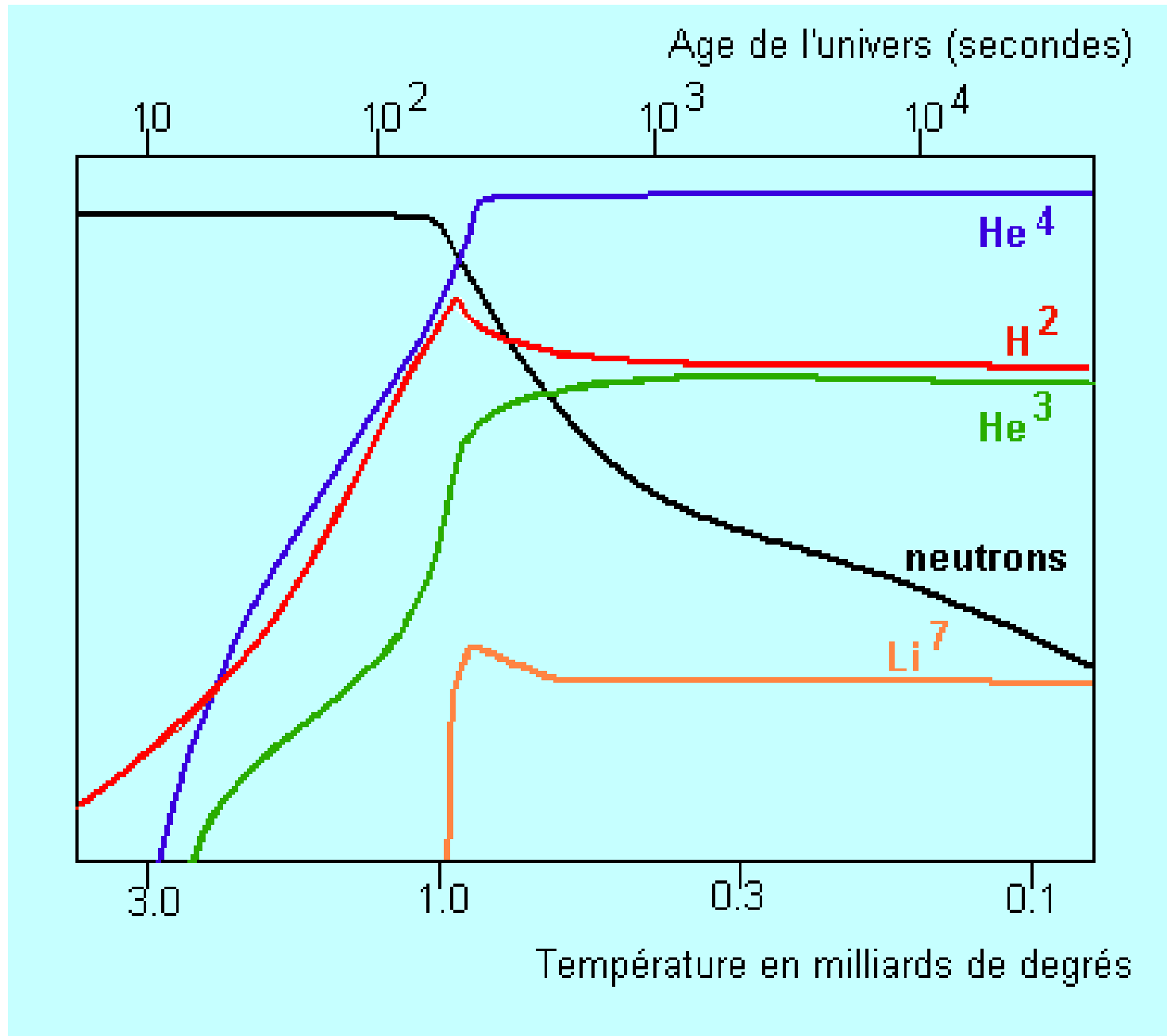
Proton



Neutron

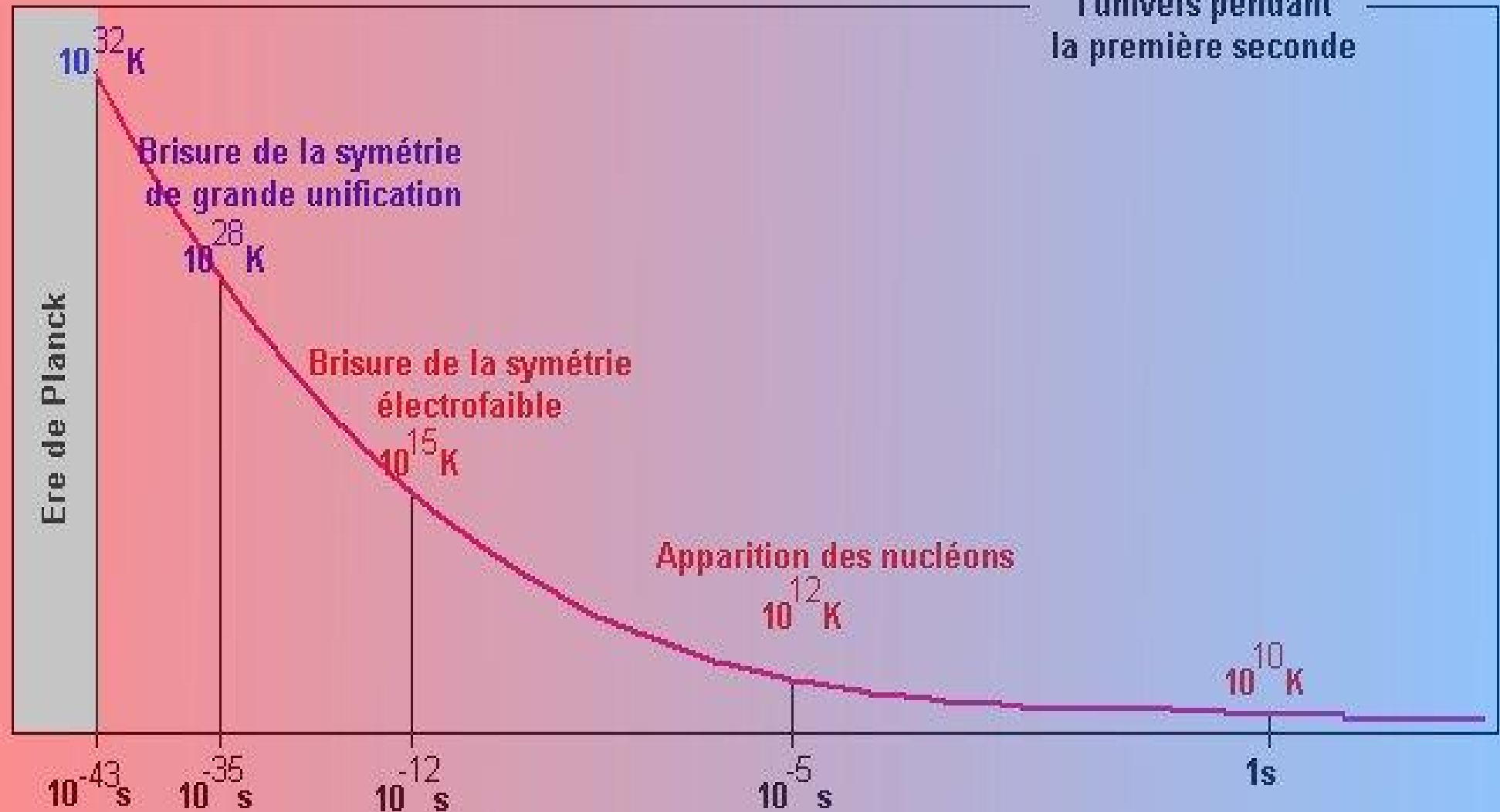
Les premiers éléments

Nucléosynthèse primordiale

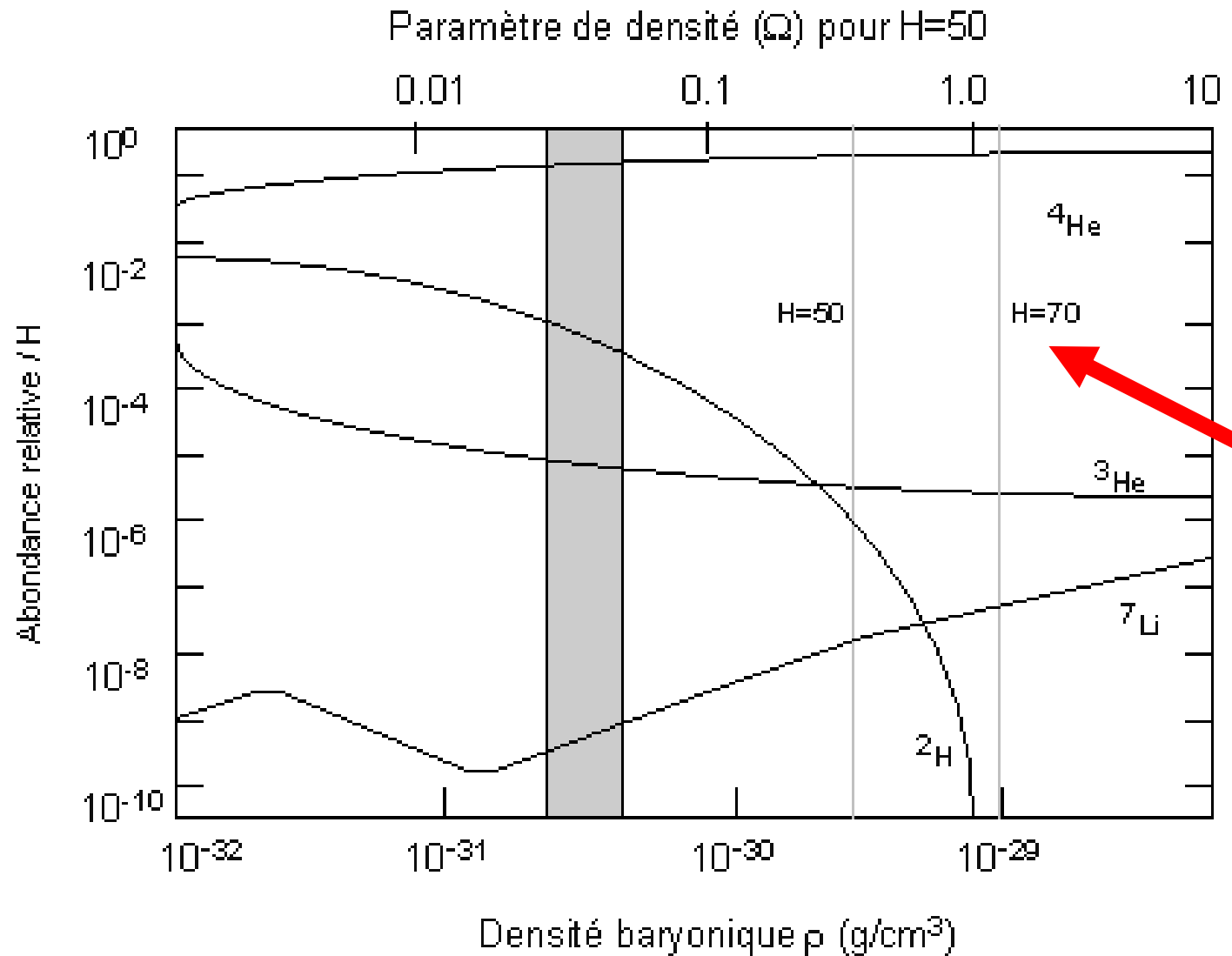


Nucléosynthèse primordiale

Evolution de la température de l'univers pendant la première seconde



Nucléosynthèse primordiale



**Proportion isotopique suivant
la valeur de la constante de Hubble**

Expansion de l'Univers

$$V = H \times D$$



Constante de Hubble

Permet de déterminer R
et de calculer dR/dt

Expansion de l'Univers

$$H = 71 \pm 4 \text{ km/s par Mpc}$$

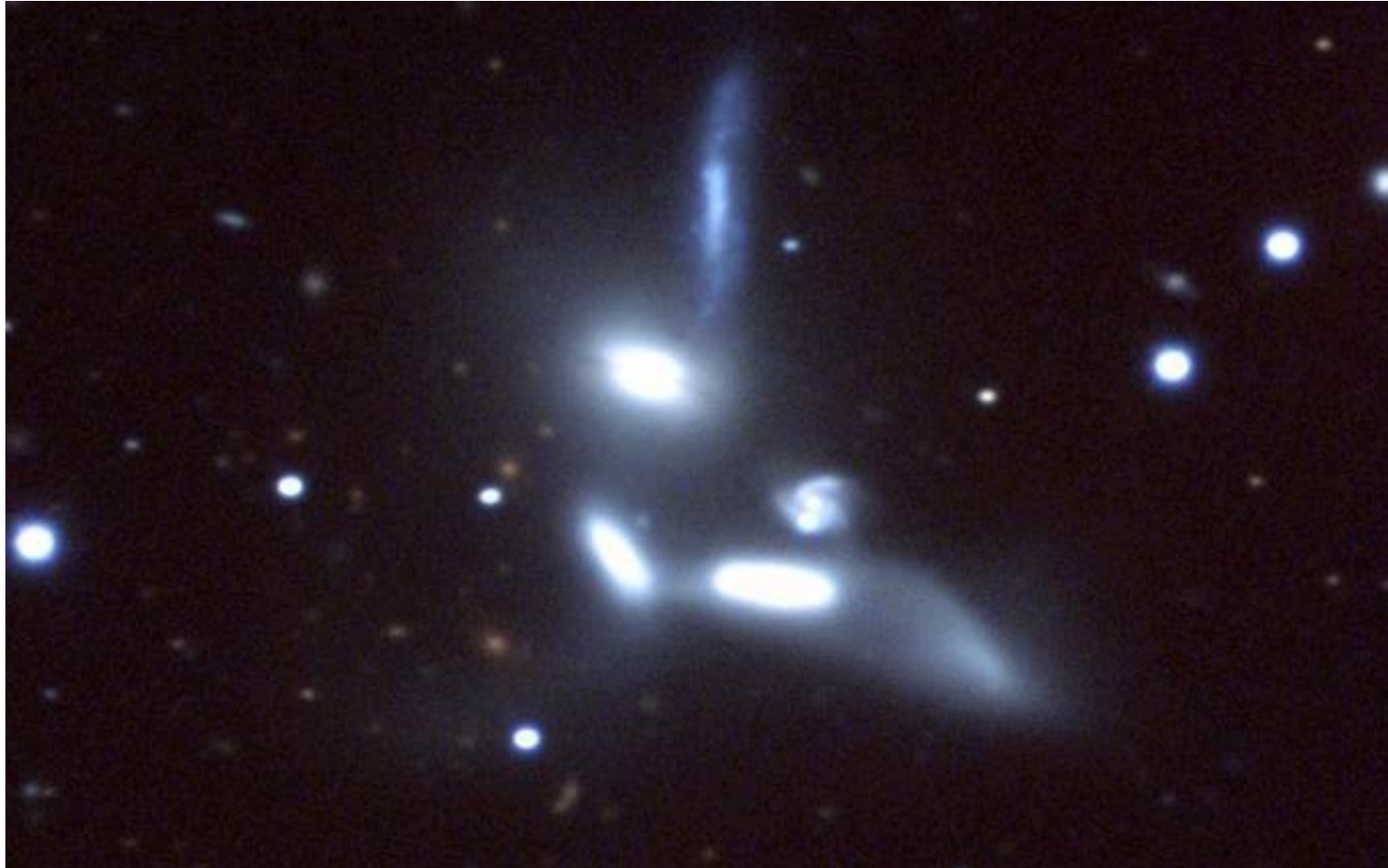


$$R \sim 0$$

il y a $13,7 \pm 0,2$ milliards d'années

Age de l'Univers

~ 14 milliards d'années



On n'observe pas d'objets plus anciens que 14 milliards d'années

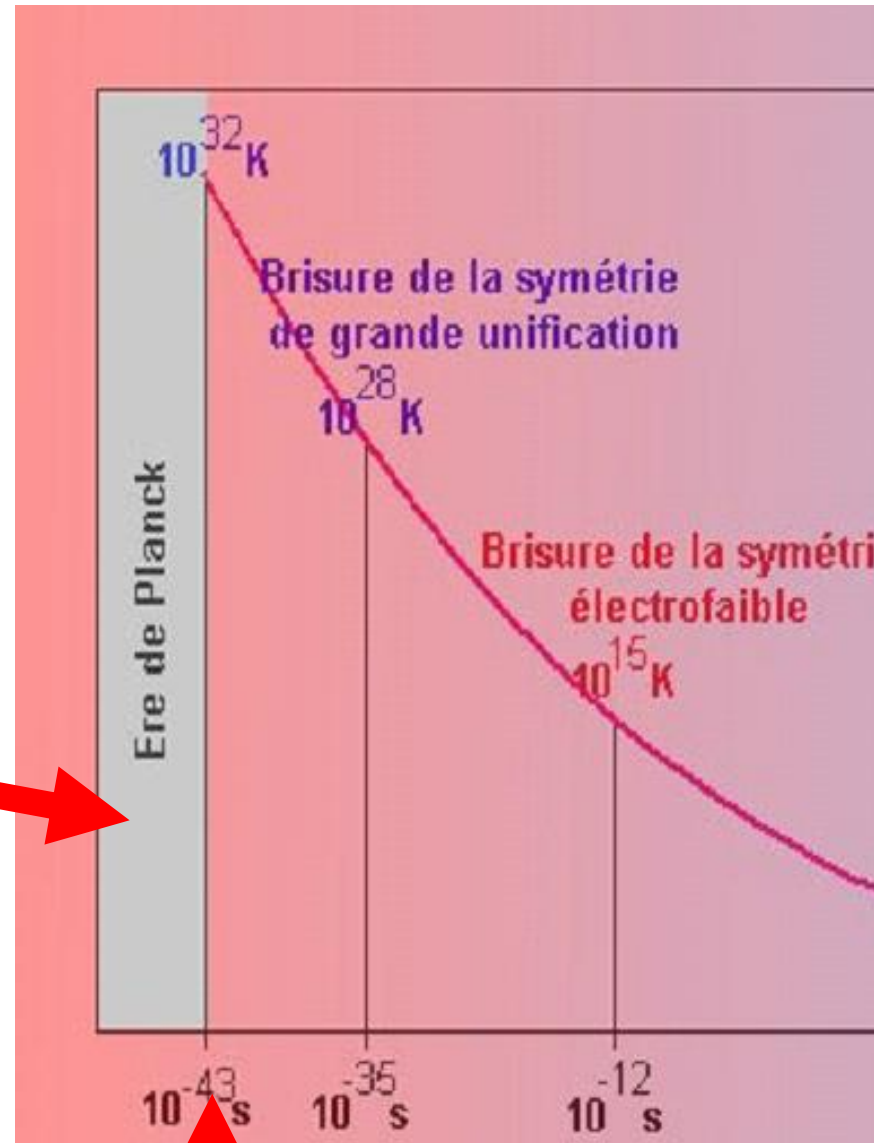
Le modèle du Big Bang

Explique :

- La nucléosynthèse primordiale
- Le fond diffus cosmologique
- La fuite des galaxies

Barrière conceptuelle

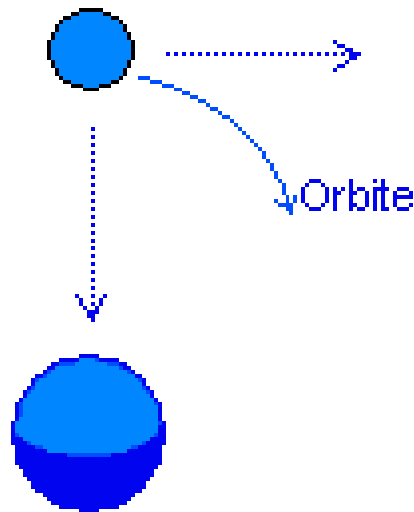
Ici, nous ne
connaissons pas
la physique



Barrière de Planck

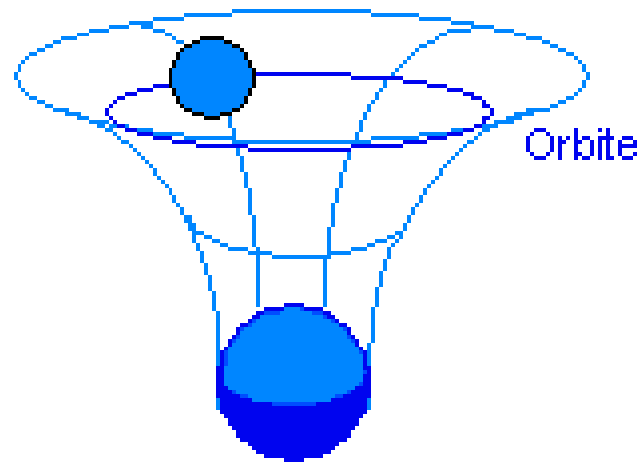
Barrière conceptuelle

Trois conceptions de la gravitation



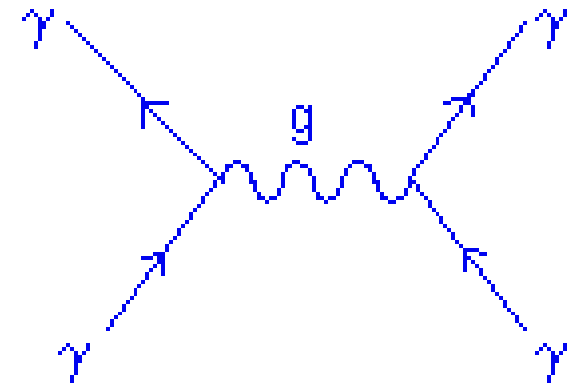
Physique de Newton

La gravitation est une **force** qui agit entre les corps.



Physique relativiste

La gravitation est une déformation de l'**espace-temps**.



Physique quantique

La gravitation est une interaction fondamentale de **gravitons virtuels**

Réunir Relativité Générale et Mécanique Quantique

Modèles actuels

$$\frac{(dR/dt)^2}{R^2} + \frac{k}{R^2} = \frac{8}{3} \pi G \rho + \frac{\Lambda}{3}$$

Dérivée première - Expansion

Modèle actuels

$$\frac{d^2R/dt^2}{R} = \frac{-4\pi}{3} G\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$

d^2R/dt^2 dérivée seconde

Accélération ou ralentissement ?

Modèles actuels

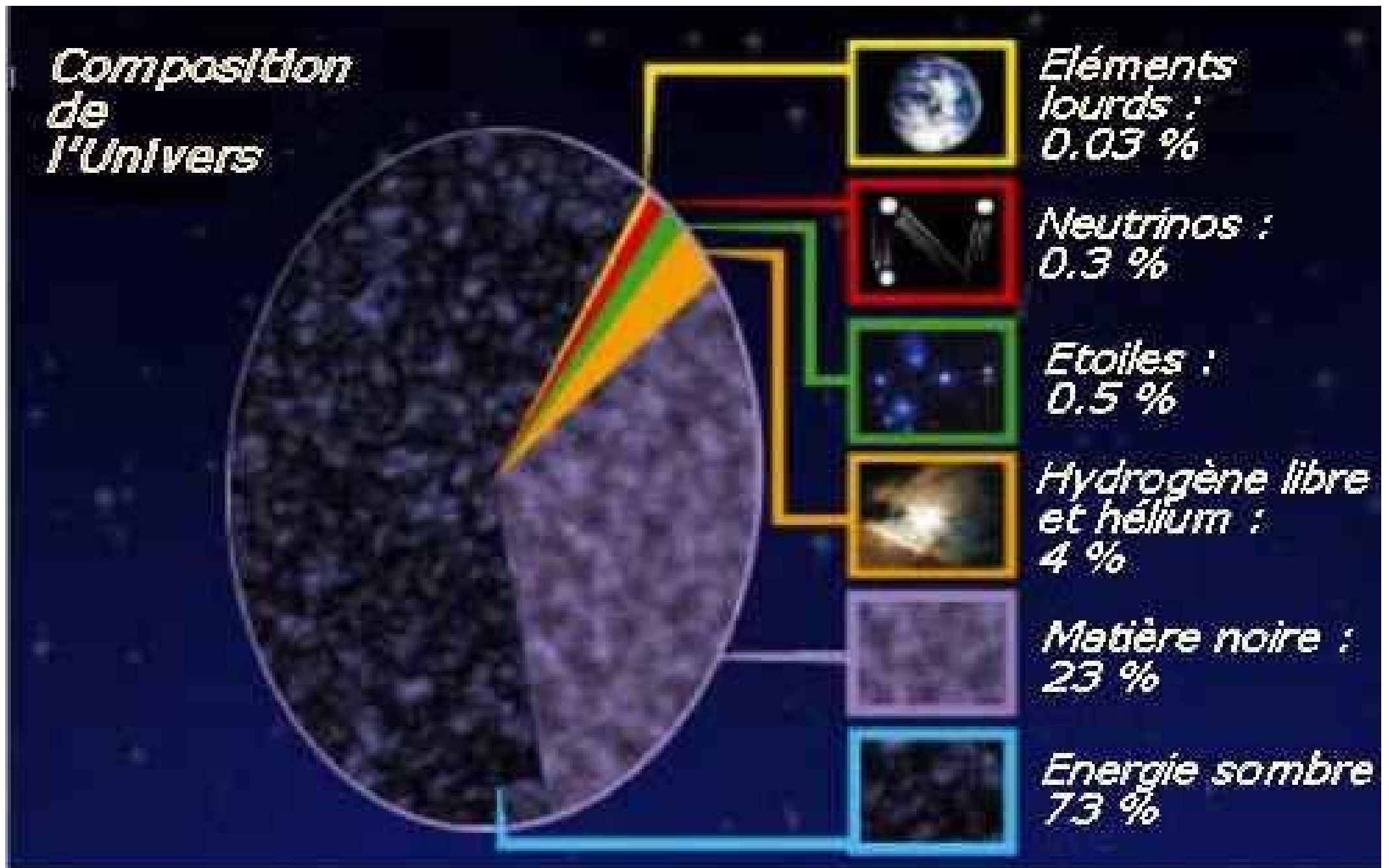
L'expansion de l'Univers devrait ralentir
sous l'effet de la gravitation

Il semble qu'au contraire elle accélère

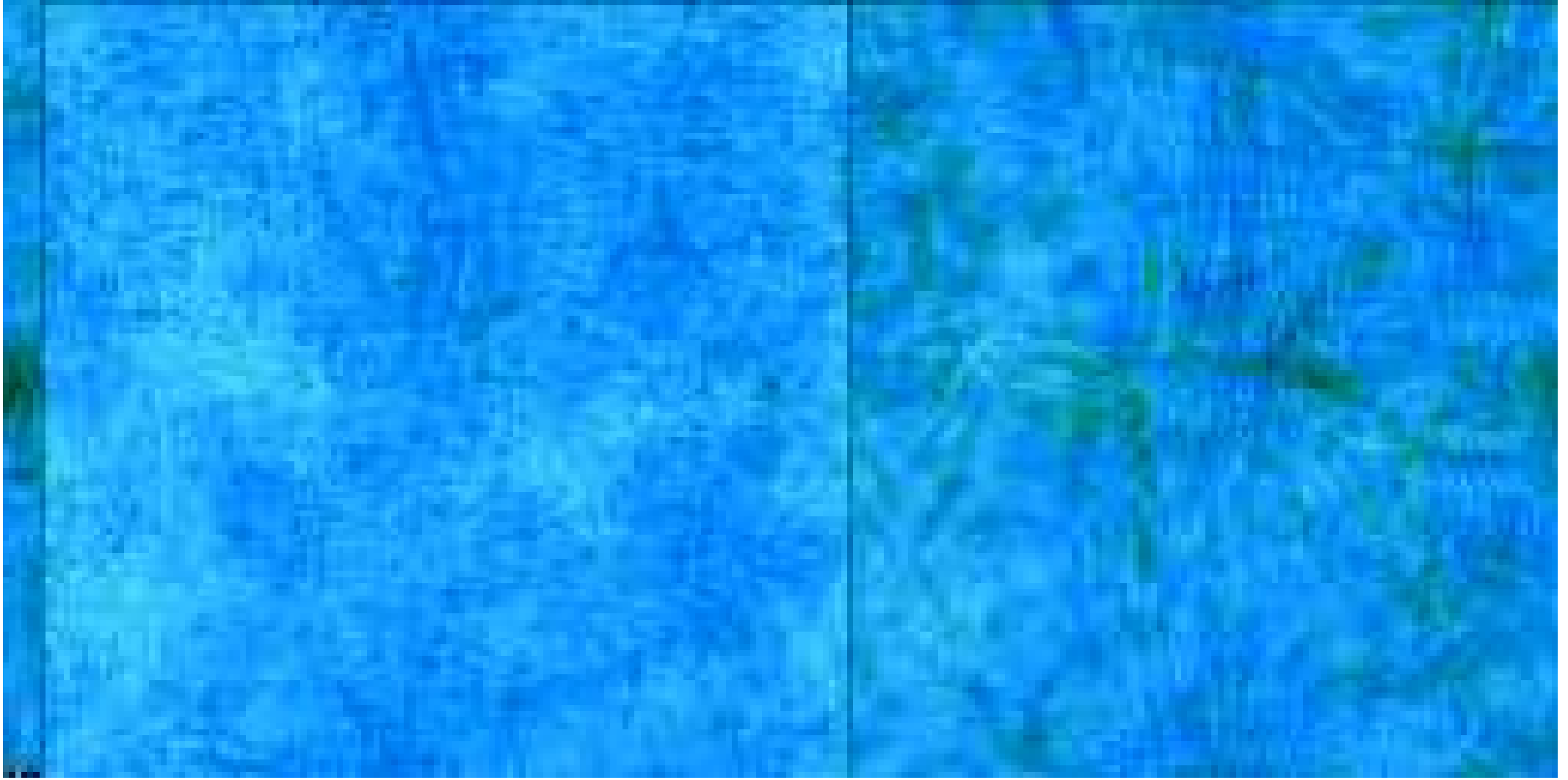


Energie sombre
(non observable)

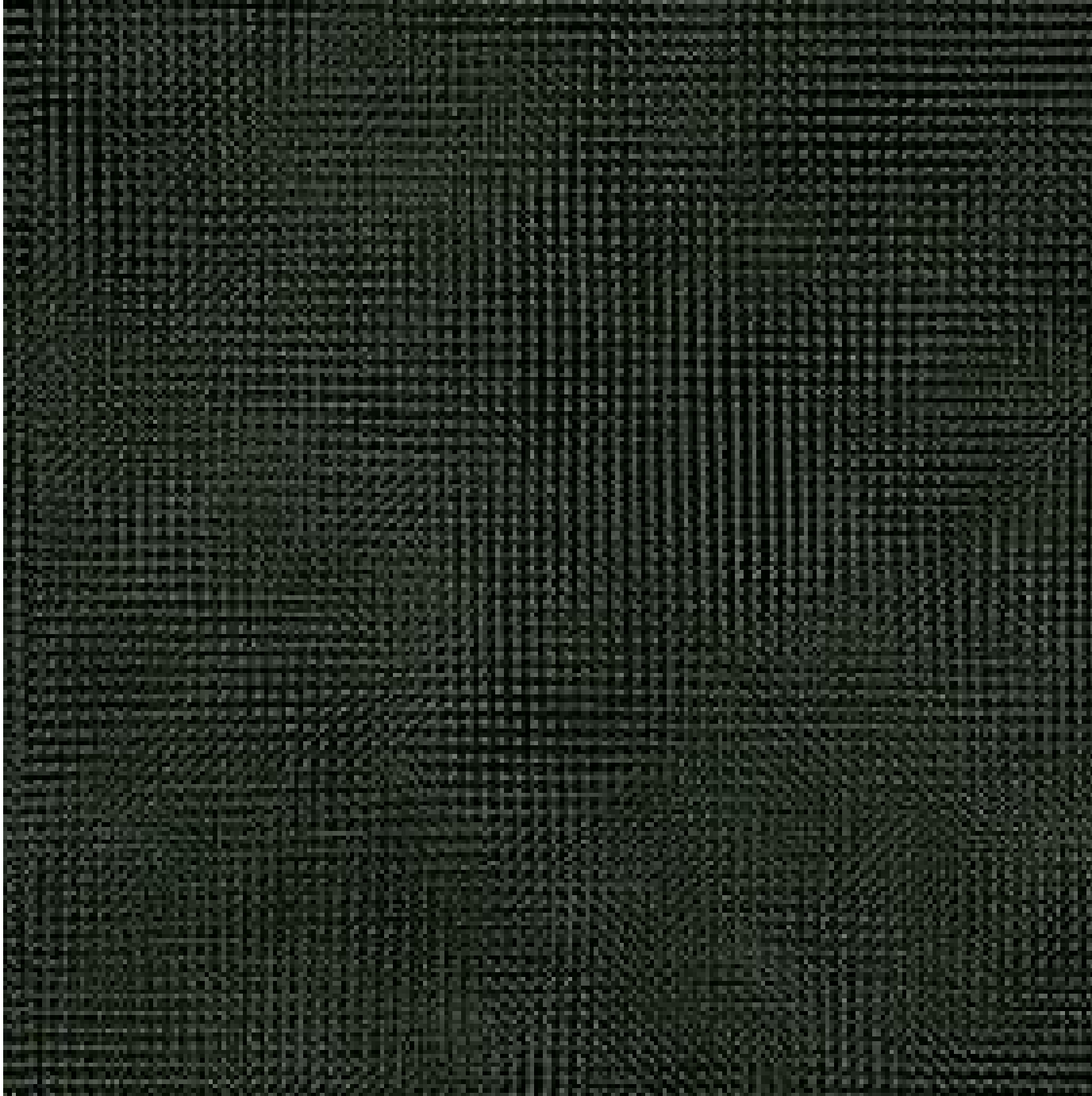
Energie sombre



Energie sombre



Energie sombre



Energie sombre

N-Body Simulation of the
Cold Dark Matter Cosmology

Energie sombre

Modifier la constante cosmologique
Interprétation physique difficile

~ fluide de densité
d'énergie constante mais
d'énergie négative donc répulsive

Energie sombre

Energie du vide (MQ)

densité d'énergie ρ_{vide}

Mais valeur calculée
dépasse la valeur
observée d'un facteur 10^{120}

Pression négative

$$p = - \rho_{\text{vide}}$$

Energie sombre

Quintessence

Champ scalaire couvrant tout l'espace

$$p = - \rho c^2$$

Avec la densité ρ qui ne  quand R 

3ème révolution cosmologique

Nouvelles solutions issues
de la théorie des supercordes
(tentative d'unification
de la RG et la MQ)

?

La 3ème révolution cosmologique est à
venir

Notre Univers

Fermé

De taille finie

Mais sans limites !

Comme notre imagination

