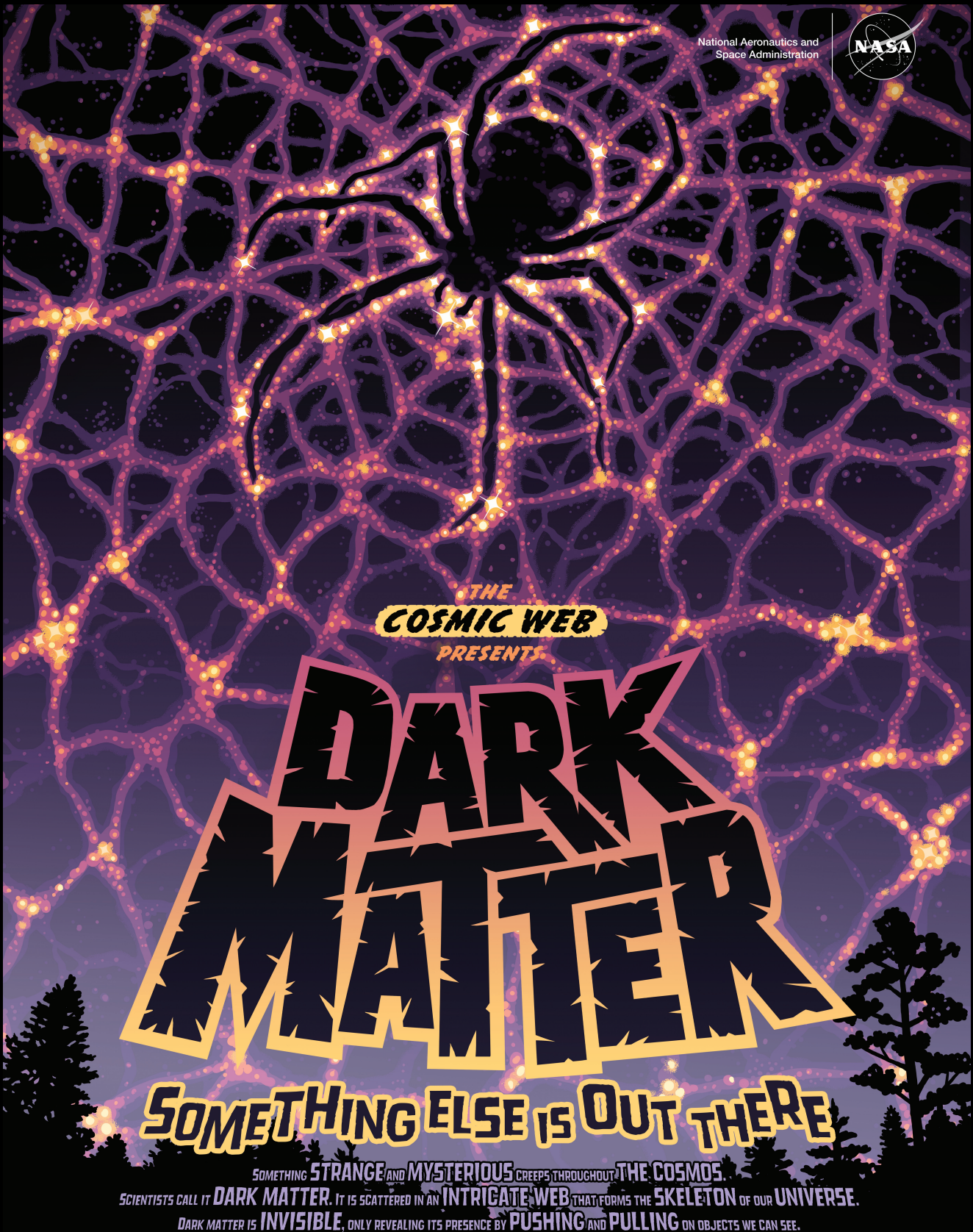


Matière noire : mirage ou réalité ?



Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 4 (31/01/23) : Succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 4 (31/01/23) : Succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

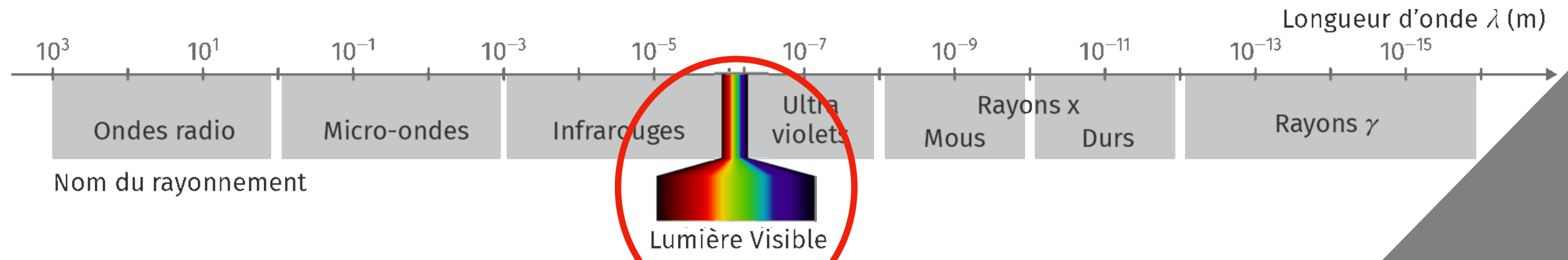
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



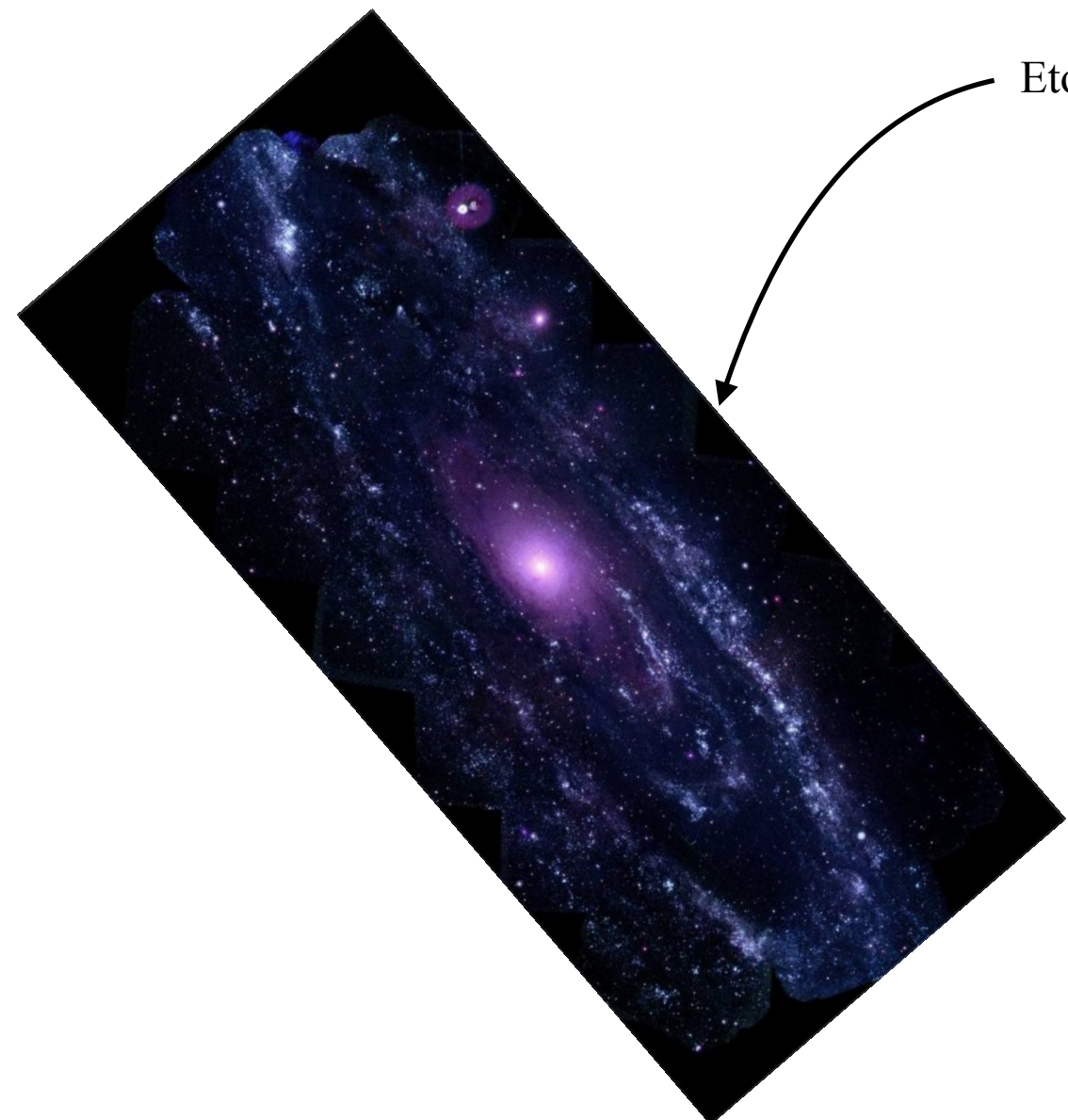
Etoiles, amas d'étoiles,
absorption due aux
poussières



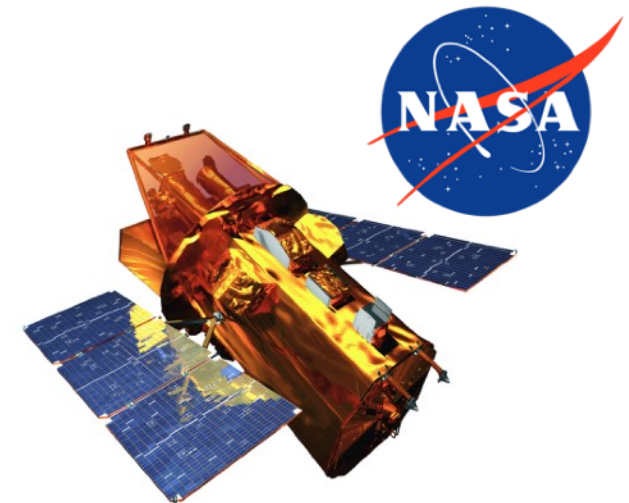
Telescope (réflecteur)



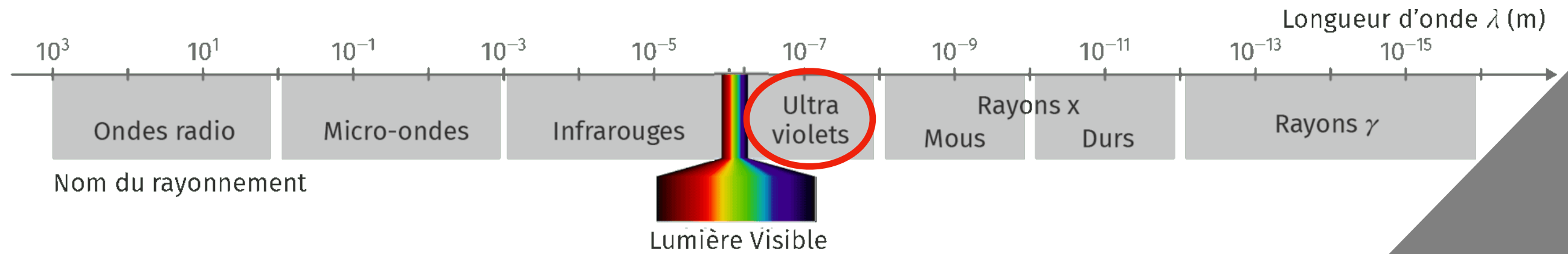
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



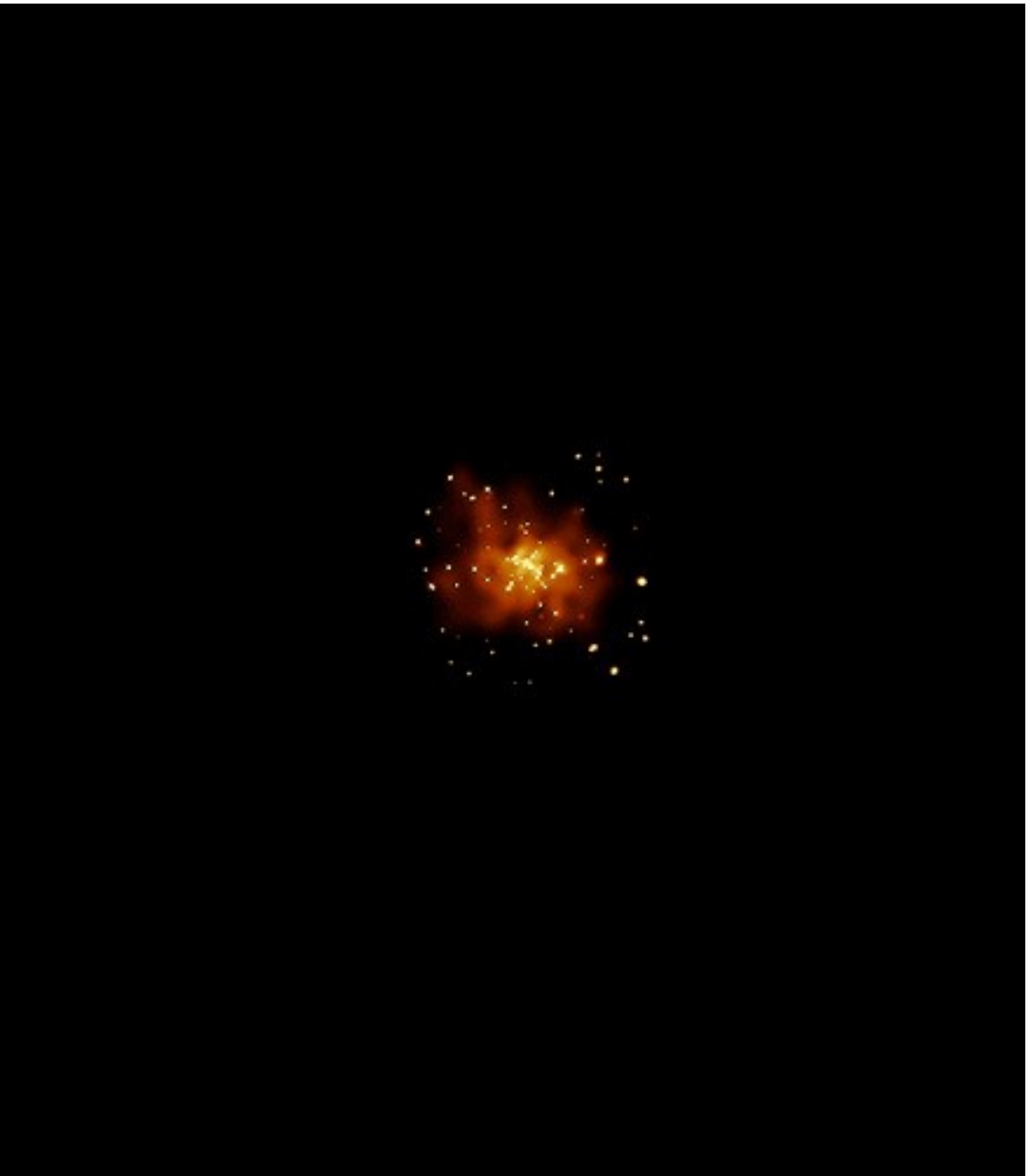
Etoiles jeunes et chaudes, amas d'étoiles



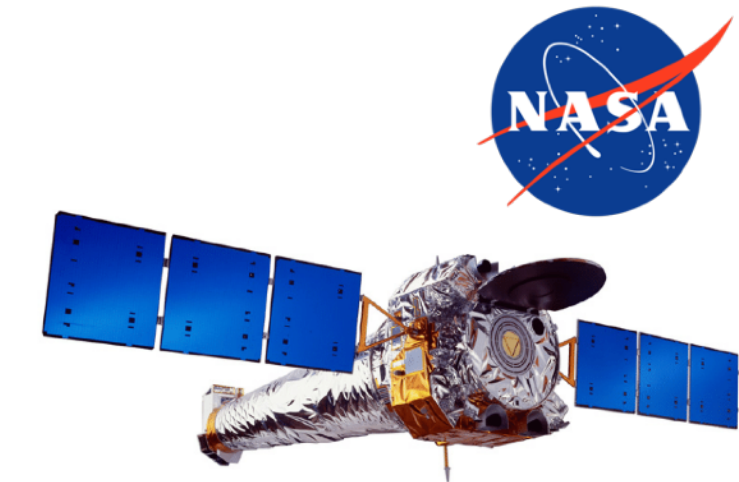
Swift space Observatory



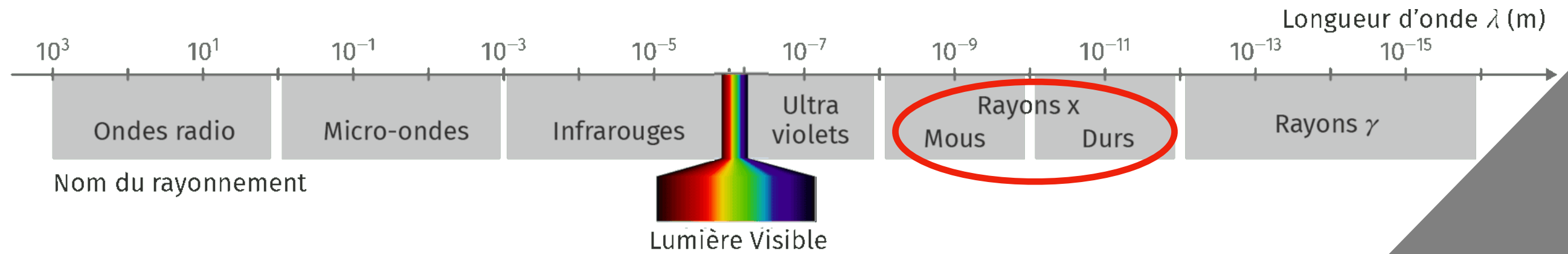
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



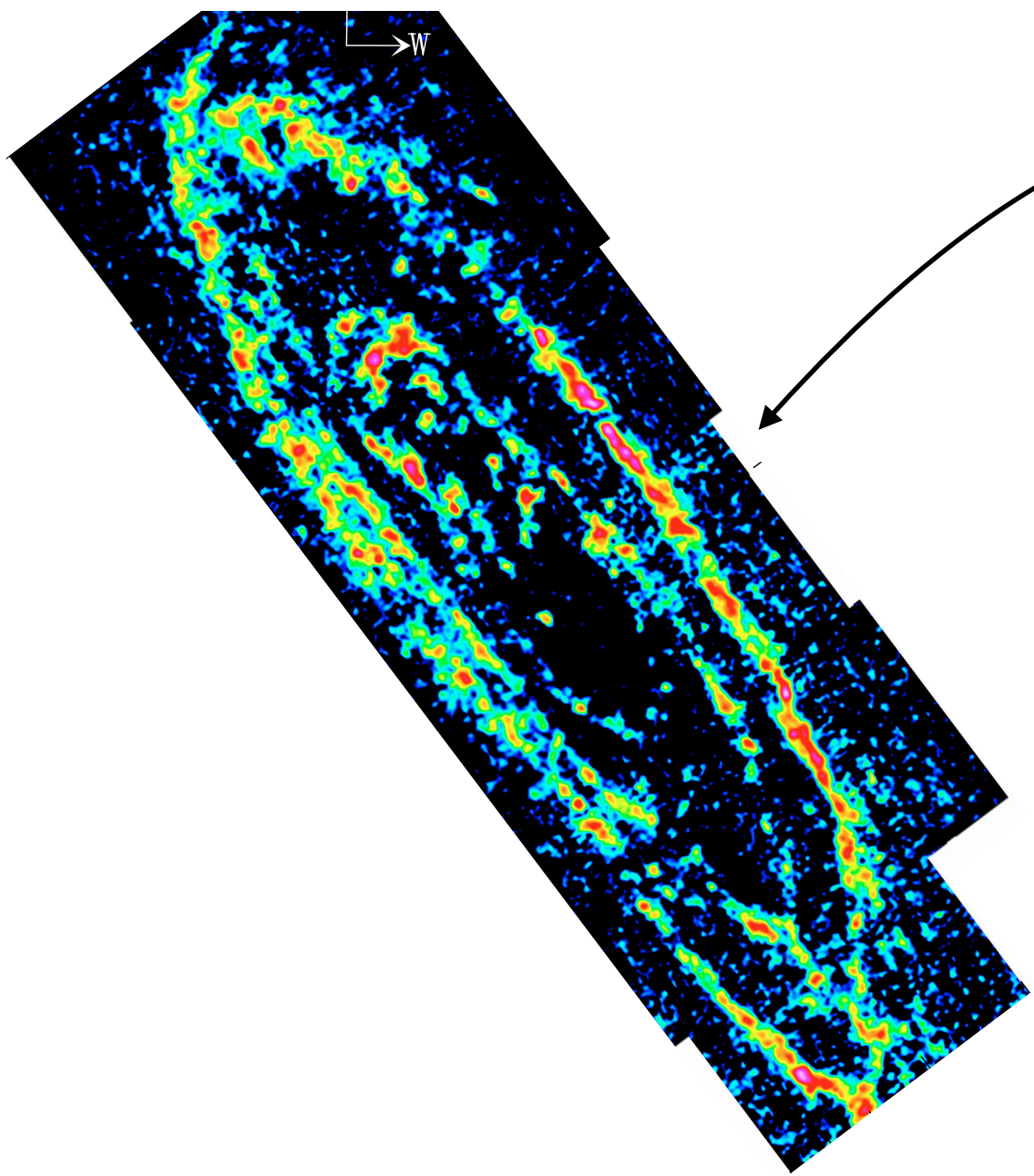
Etoiles massives en fin de vie (étoiles binaires, débris d'explosions de supernovae)



Chandra X-ray observatory



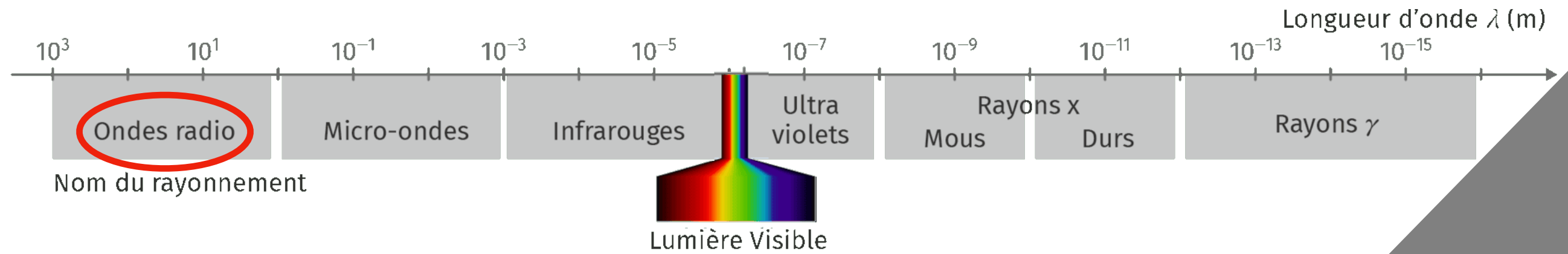
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



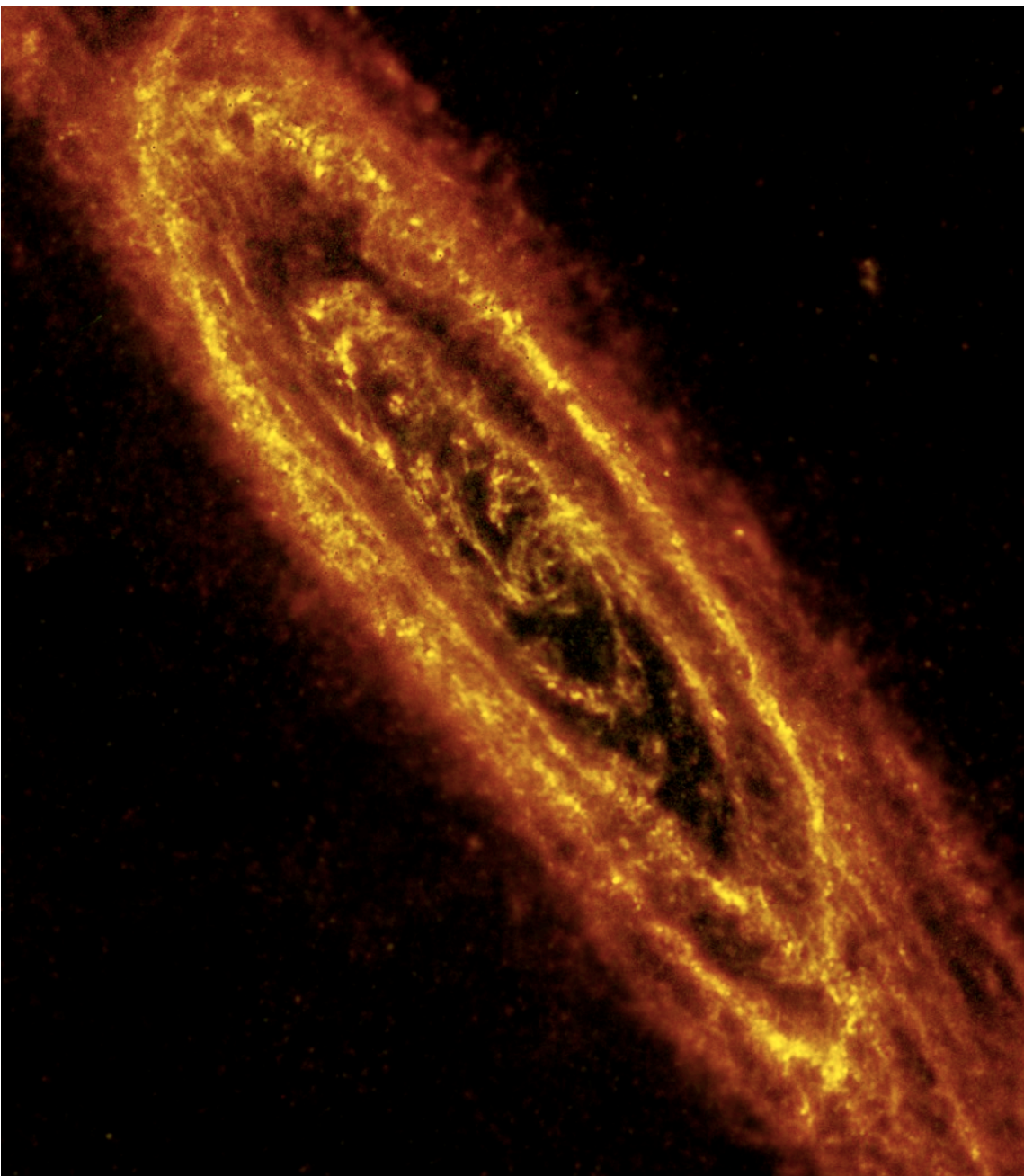
Gaz moléculaire froid (CO)



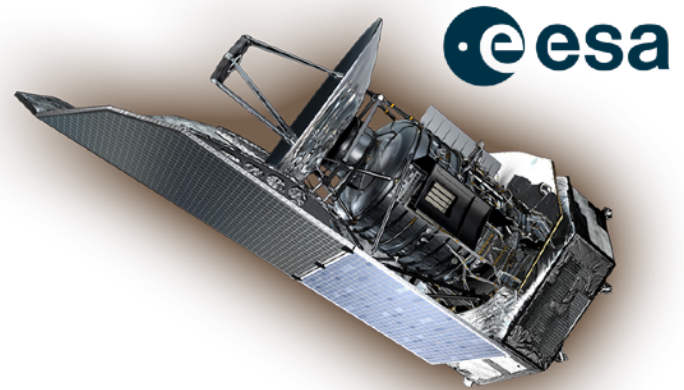
Radiotélescope de 30m



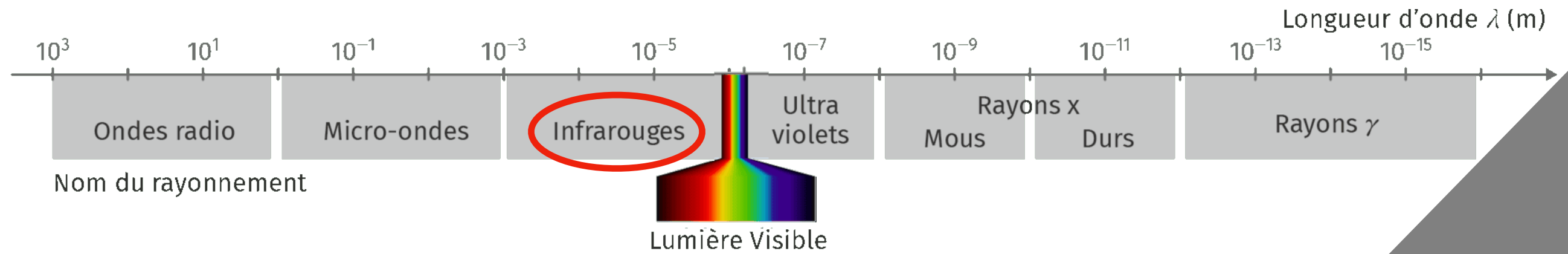
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



Poussières chauffées par les étoiles



Herschel Space Telescope

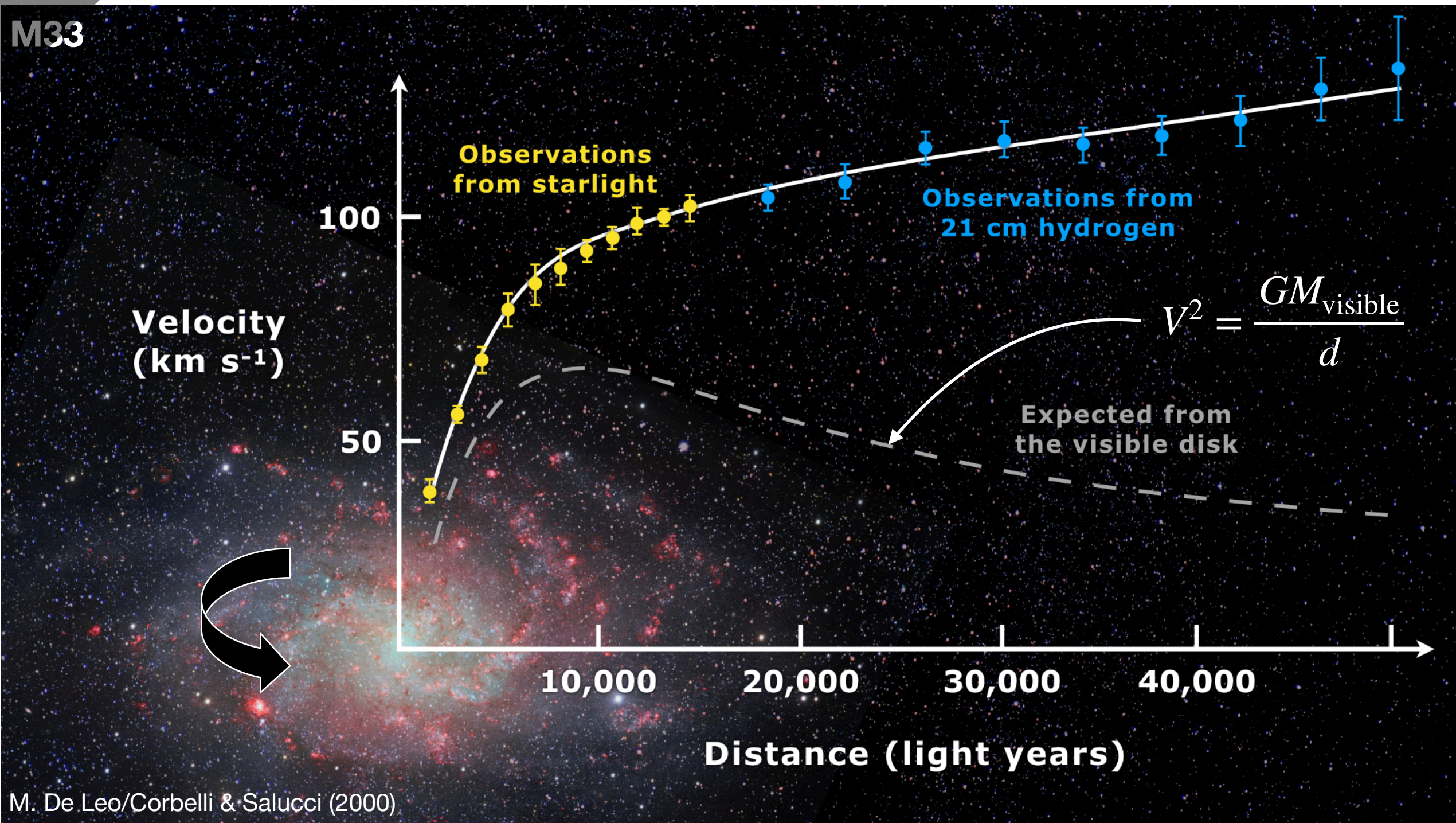


Un halo de matière noire ?

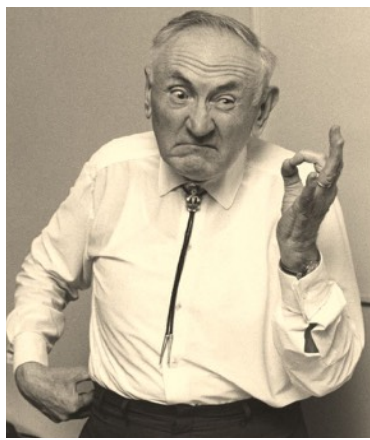


Indications en faveur de la matière noire

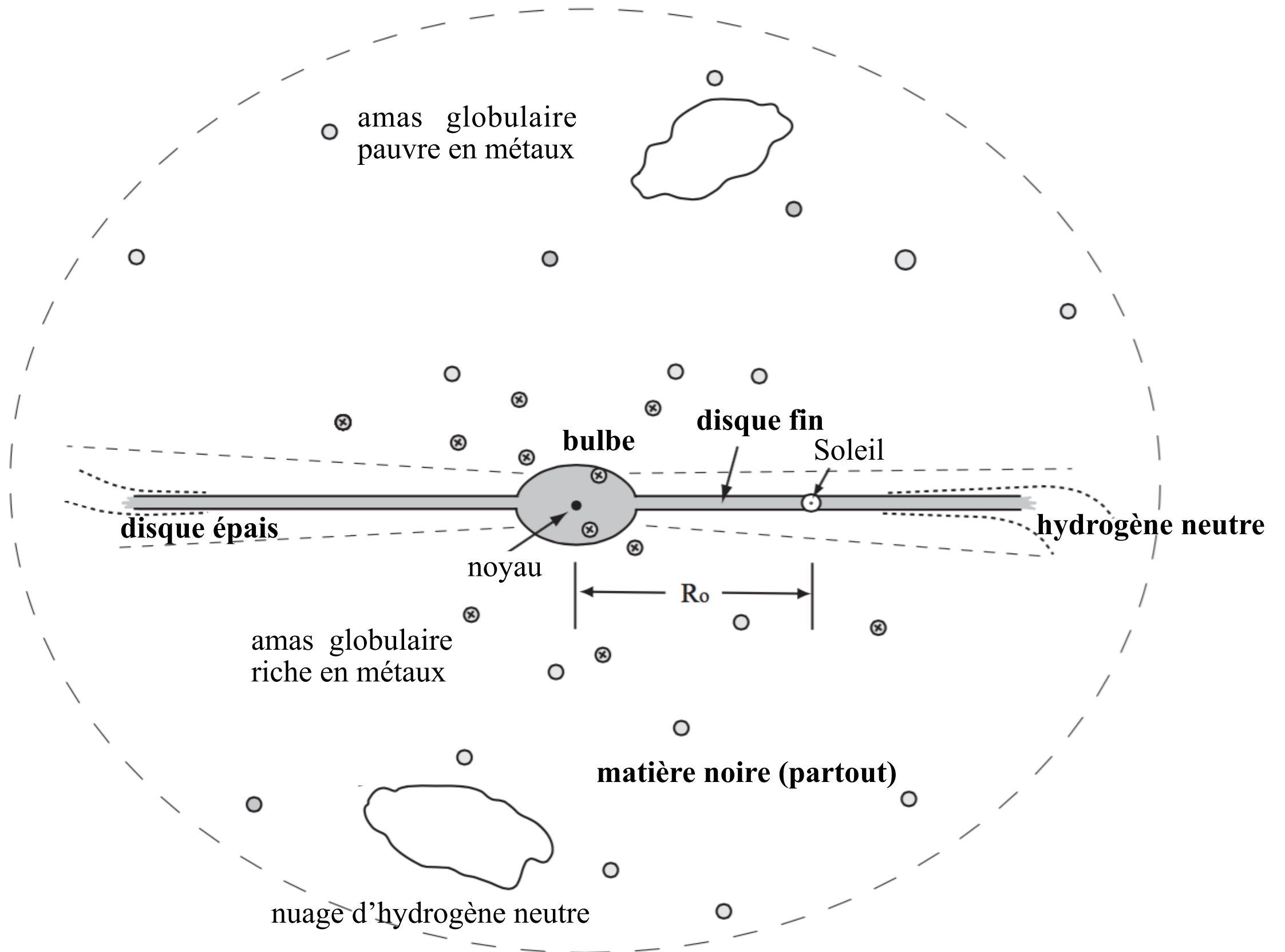
Courbe de rotation des galaxies



Fritz Zwicky, Vera Rubin & Albert Bosma



Vue schématique d'une galaxie



Autres indications en faveur de la matière noire : la stabilité des disques galactiques

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 168:343-359, 1971 September 15
© 1971. The University of Chicago. All rights reserved. Printed in U S A.

NUMERICAL EXPERIMENTS WITH A DISK OF STARS

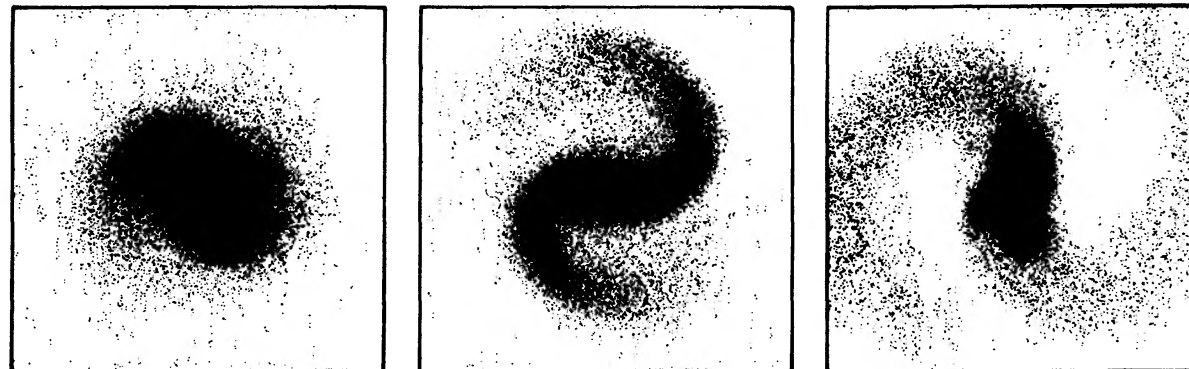
FRANK HOHL

NASA, Langley Research Center, Hampton, Virginia

Received 1971 March 10; revised 1971 April 28

ABSTRACT

The evolution of an initially balanced rotating disk of stars with an initial velocity dispersion given by Toomre's local criterion is investigated by means of a computer model for isolated disks of stars. **It is found that the disk is unstable against very large-scale modes.** After about two rotations the central portion of the disk tends to assume a bar-shaped structure. A stable axisymmetric disk with a velocity dispersion much larger than that given by Toomre's criterion is generated. The final mass distribution for the disk gives a high-density central core and a disk population of stars that is closely approximated by an exponential variation.



t = 9.5

t = 10.0

t = 10.5

Les premières simulations numériques de disques galactiques n'étaient pas stables.

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 186:467-480, 1973 December 1
© 1973. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

A NUMERICAL STUDY OF THE STABILITY OF FLATTENED GALAXIES: OR, CAN COLD GALAXIES SURVIVE?*

J. P. OSTRICKER

Princeton University Observatory

AND

P. J. E. PEEBLES

Joseph Henry Laboratories, Princeton University

Received 1973 May 29

ABSTRACT

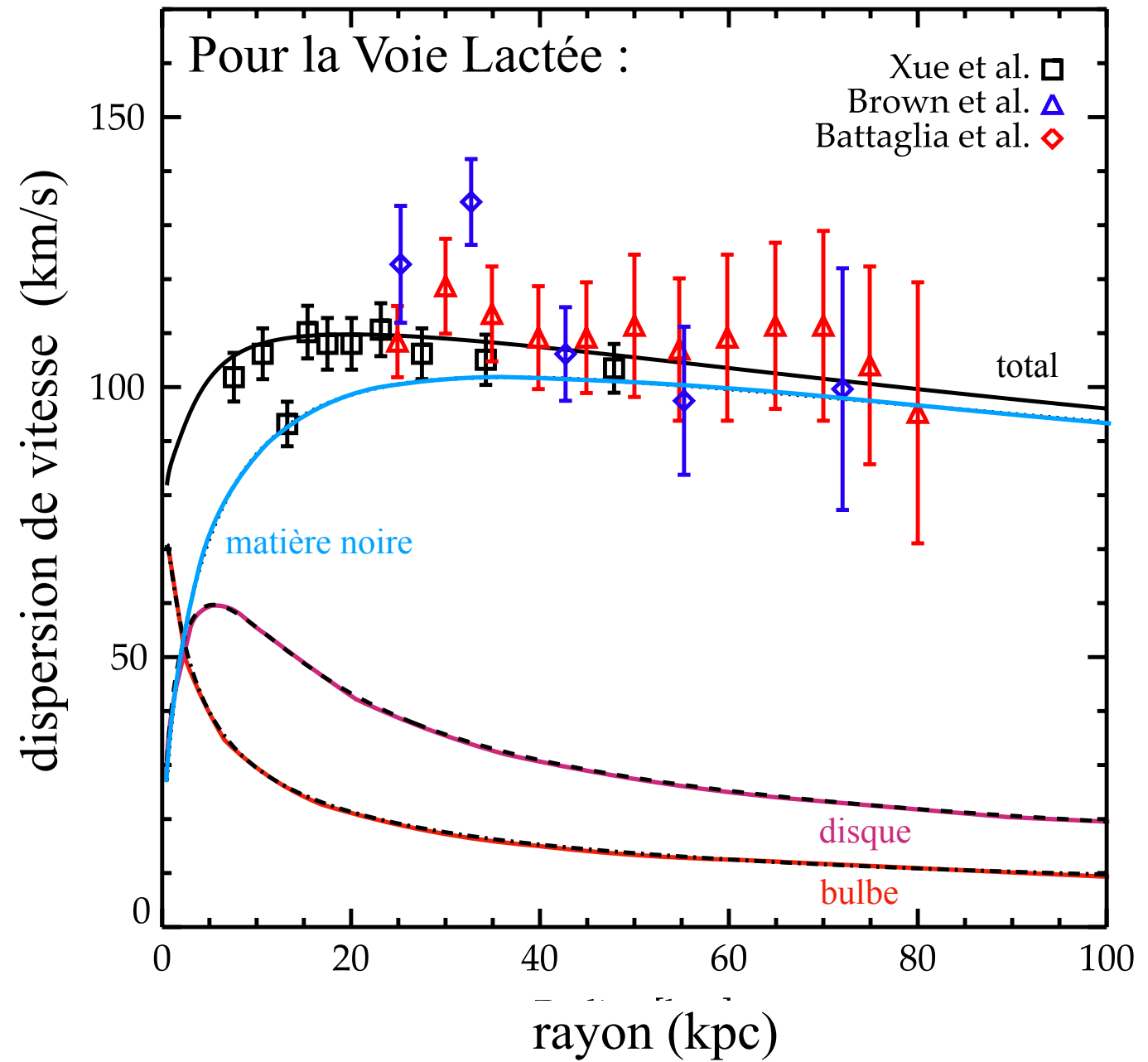
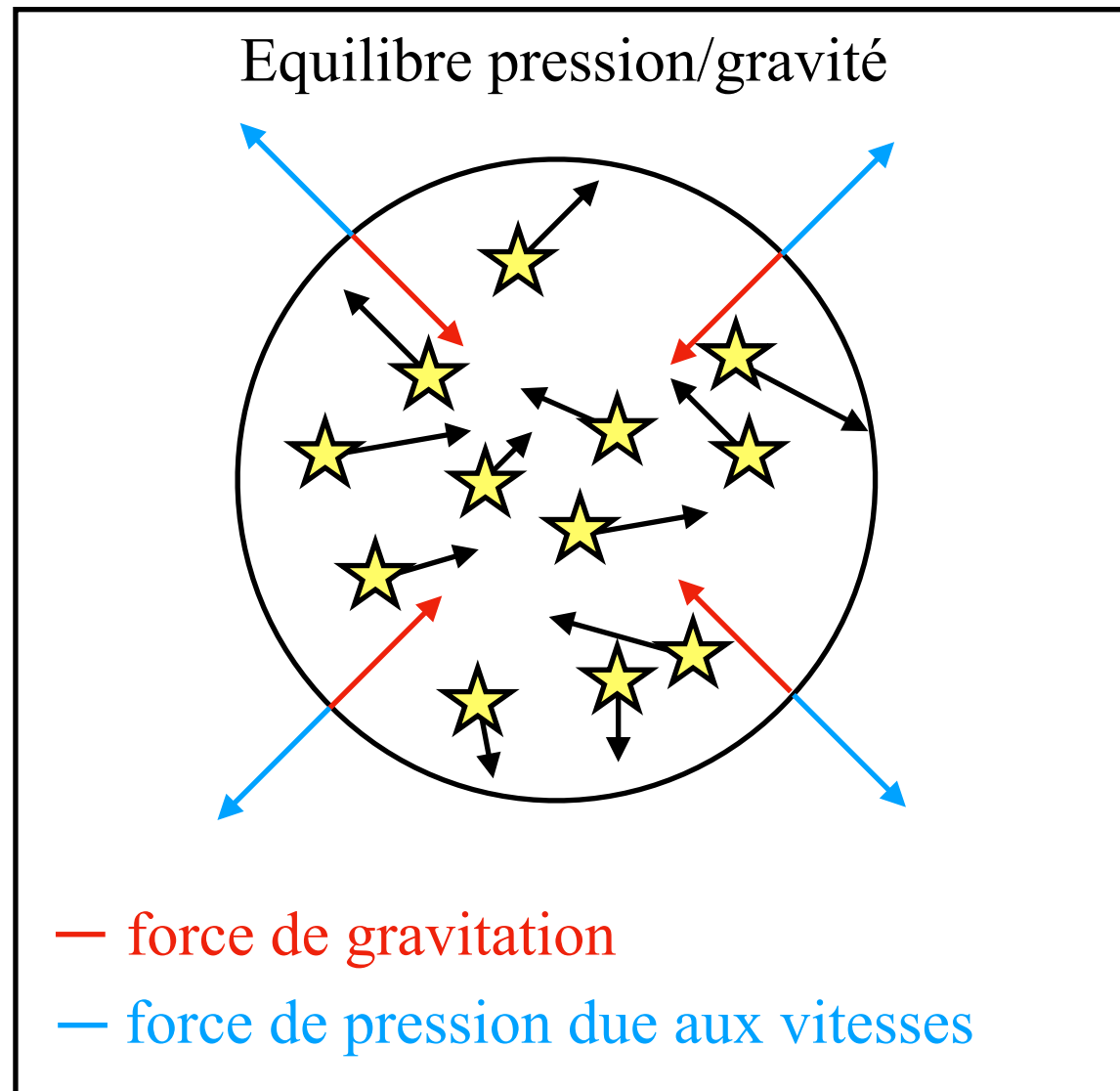
To study the stability of flattened galaxies, we have followed the evolution of simulated galaxies containing 150 to 500 mass points. **Models which begin with characteristics similar to the disk of our Galaxy (except for increased velocity dispersion and thickness to assure local stability) were found to be rapidly and grossly unstable** to barlike modes. These modes cause an increase in random kinetic energy, with approximate stability being reached when the ratio of kinetic energy of rotation to total gravitational energy, designated ϵ , is reduced to the value of 0.14 ± 0.02 . Parameter studies indicate that the result probably is not due to inadequacies of the numerical N -body simulation method. A survey of the literature shows that a critical value for limiting stability $\epsilon \simeq 0.14$ has been found by a variety of methods.

Models with added spherical (halo) component are more stable. It appears that halo-to-disk mass ratios of 1 to 2½, and an initial value of $\epsilon \simeq 0.14 \pm 0.03$, are required for stability. If our Galaxy (and other spirals) do not have a substantial unobserved mass in a hot disk component, then apparently the halo (spherical) mass *interior* to the disk must be comparable to the disk mass. Thus normalized, the halo masses of our Galaxy and of other spiral galaxies *exterior* to the observed disks may be extremely large.

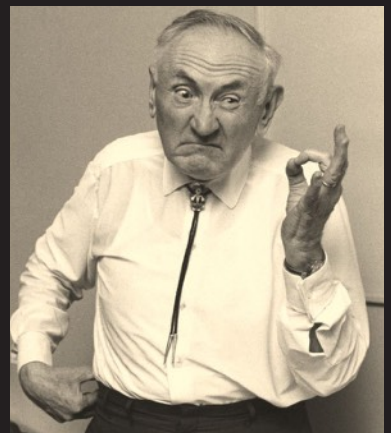
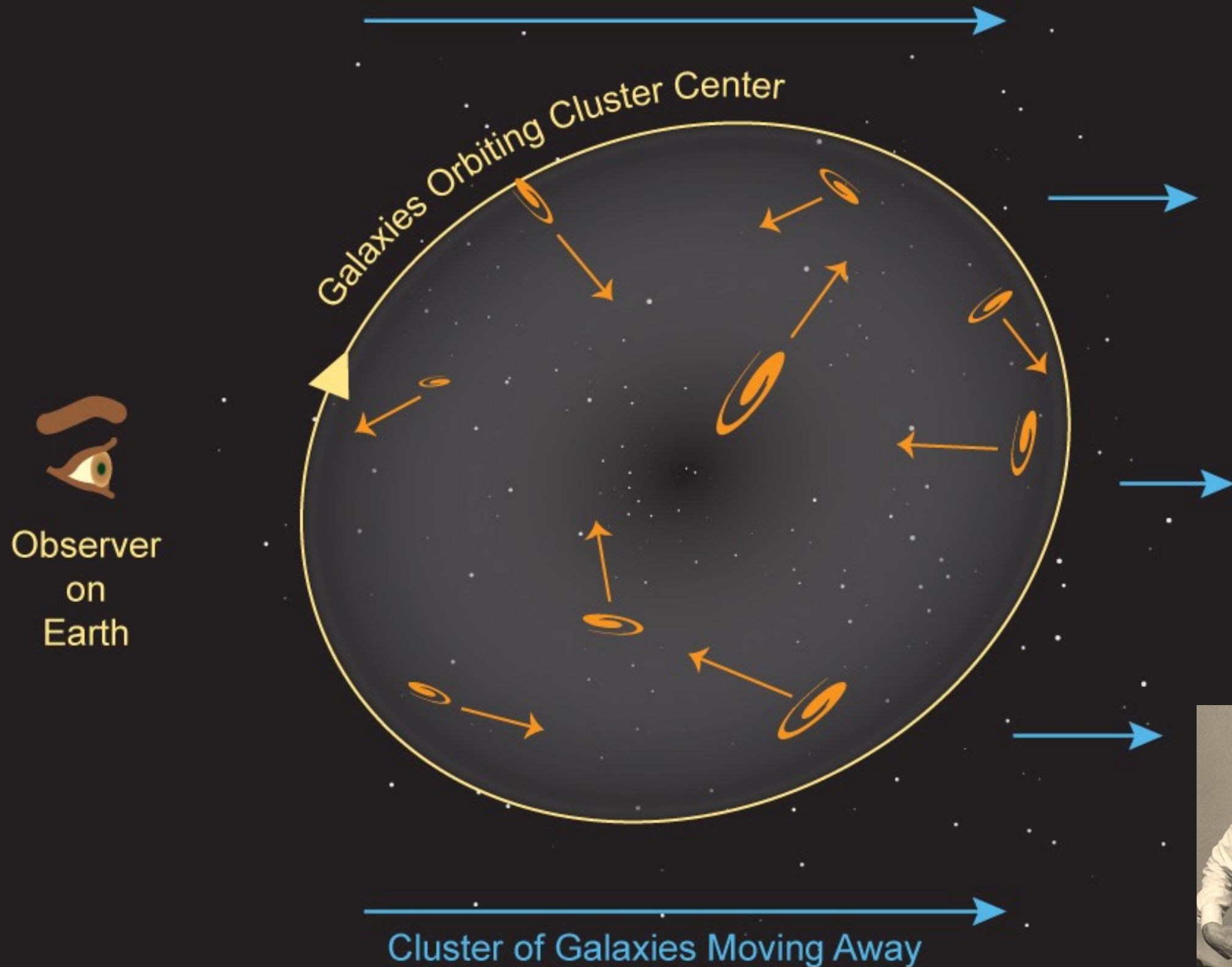
Subject headings: galactic structure — stellar dynamics

Entourer les disques d'un halo sphérique de matière invisible permettait de les stabiliser

Autres indications en faveur de la matière noire : les dispersions de vitesse des galaxies

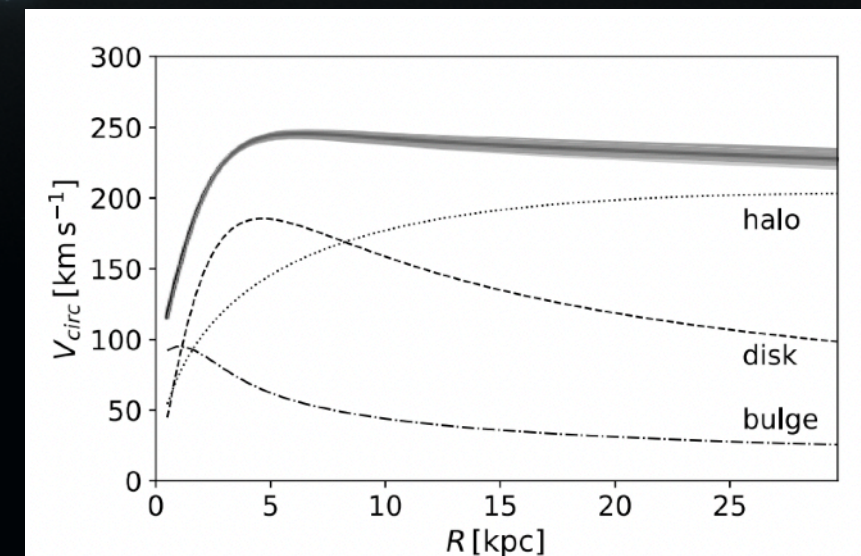
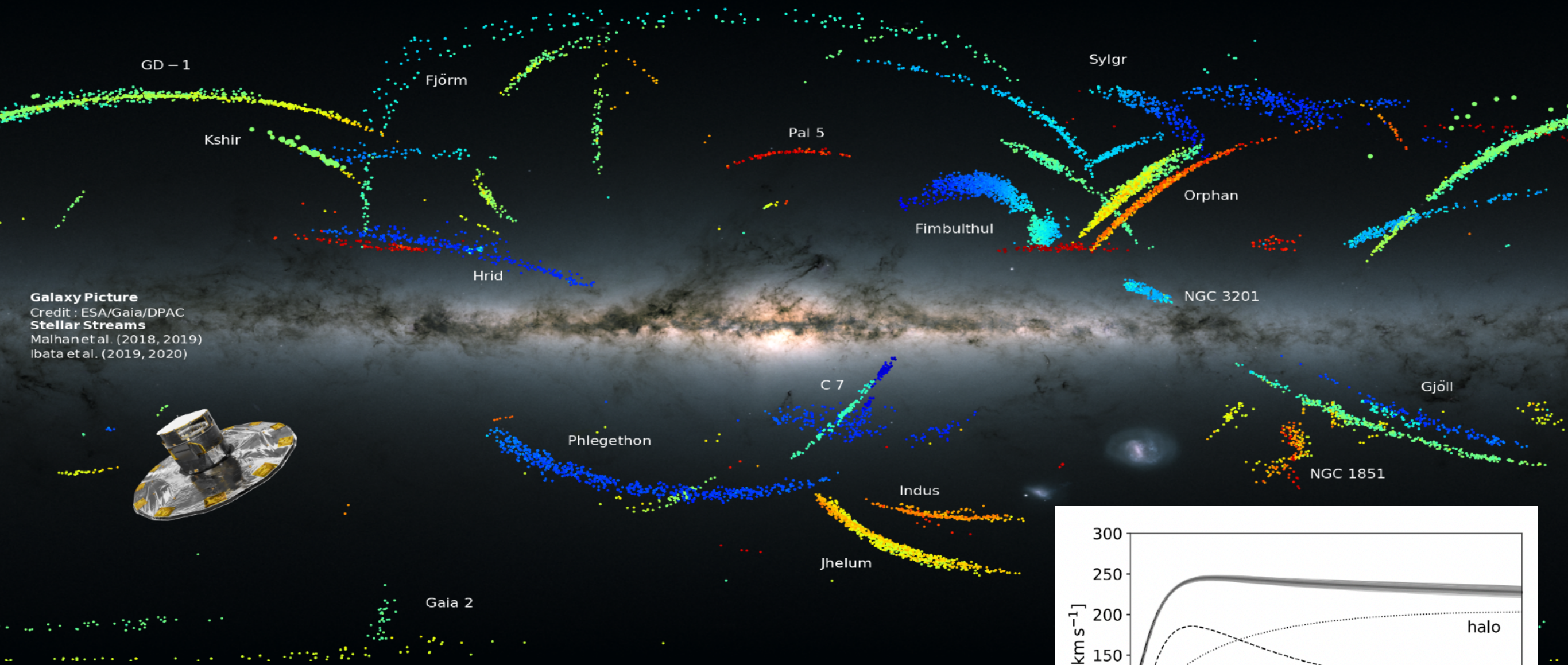


Autres indications en faveur de la matière noire : les dispersions de vitesse des galaxies



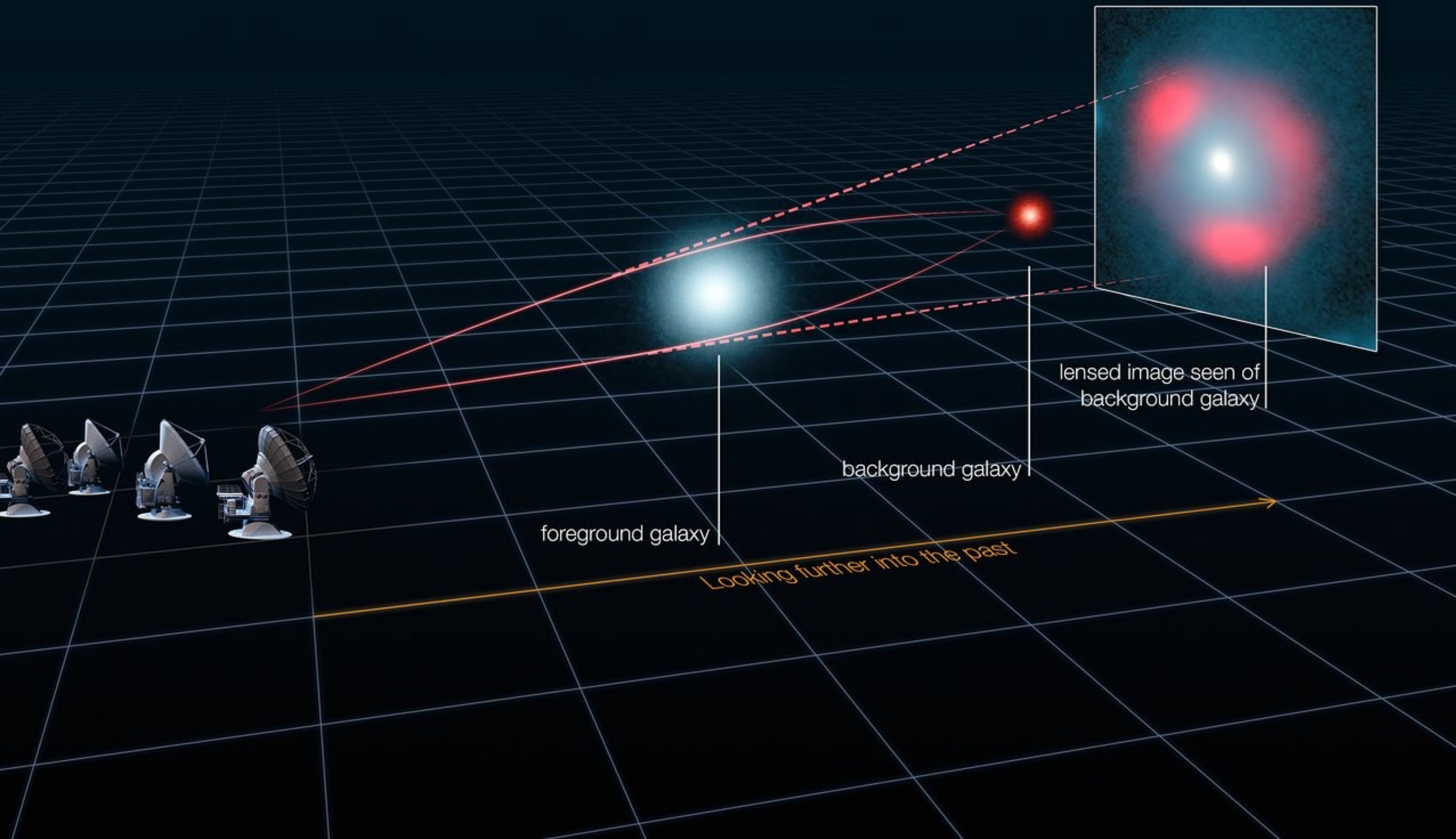
Fritz Zwicky (1933)

Autres indications en faveur de la matière noire : les courants d'étoiles autour de la Voie Lactée



Malhan & Ibata (2019)

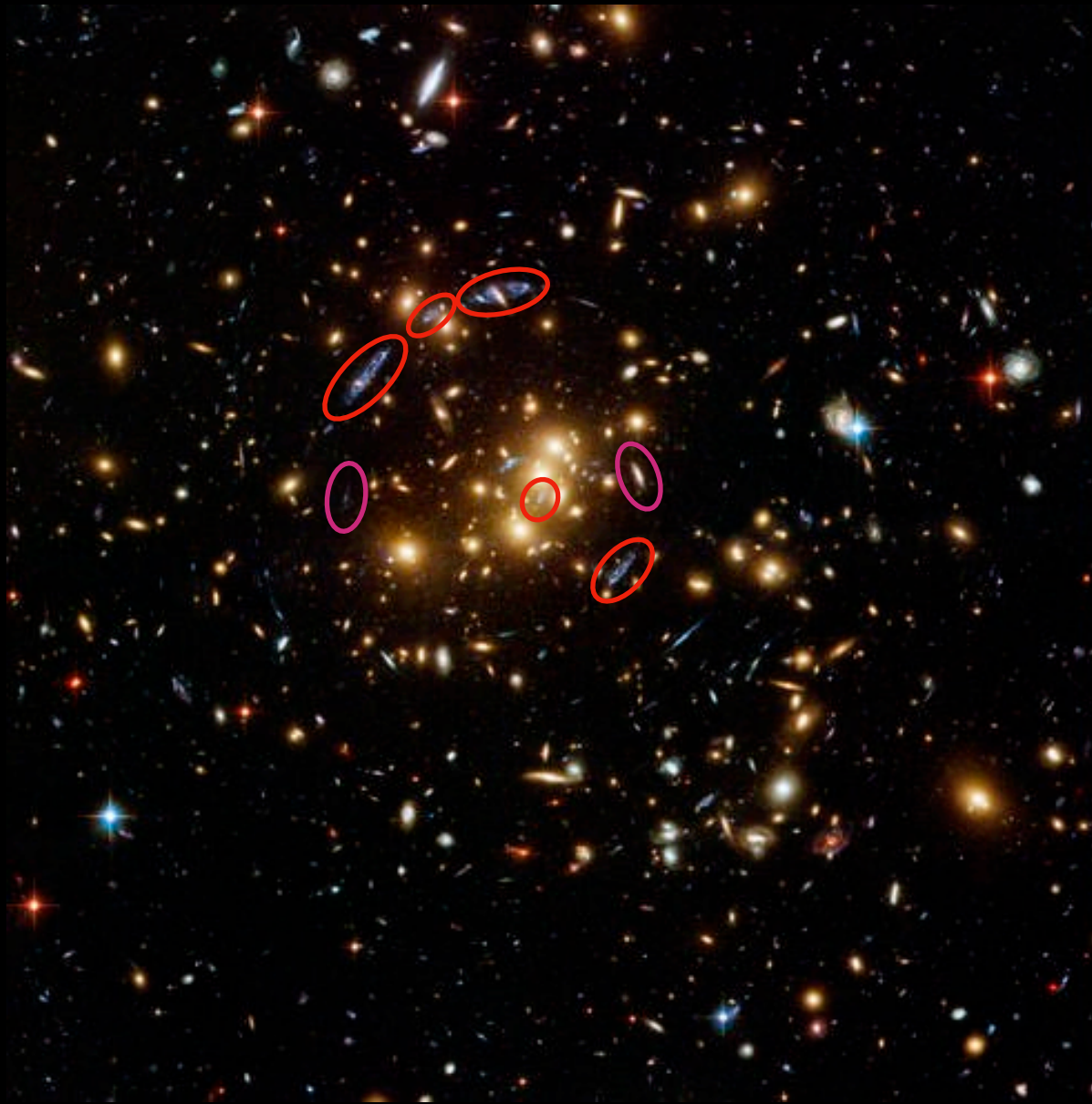
Autres indications en faveur de la matière noire : les lentilles gravitationnelles



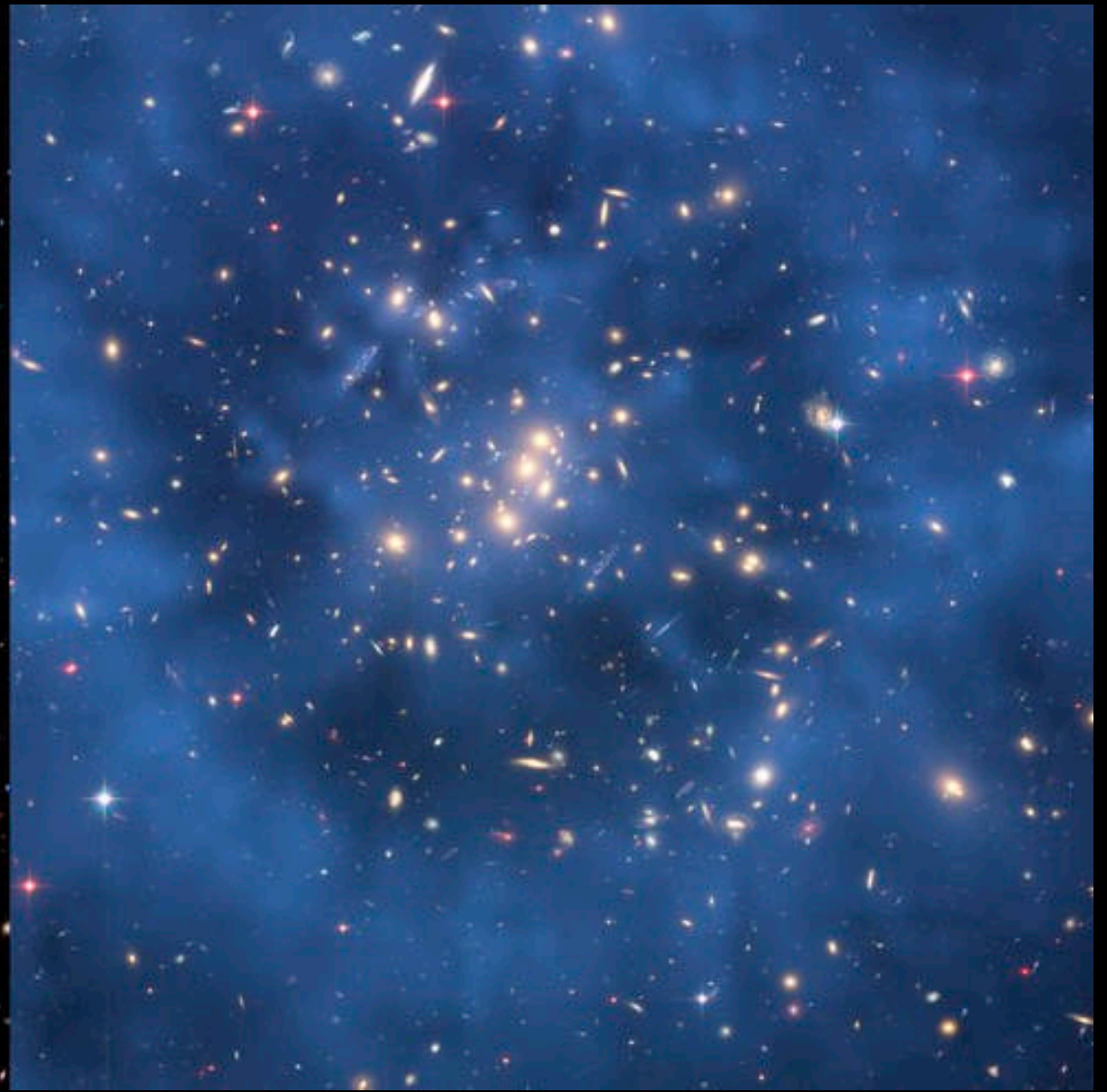
Autres indications en faveur de la matière noire : les lentilles gravitationnelles



Autres indications en faveur de la matière noire : les lentilles gravitationnelles



Un amas de galaxie (Cl 0024+17)



La matière noire nécessaire

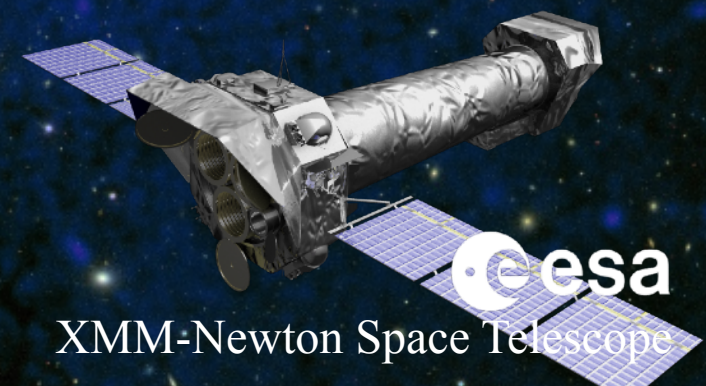
Autres indications en faveur de la matière noire : les lentilles gravitationnelles



Hubble Space Telescope

Autres indications en faveur de la matière noire : le gaz chaud des amas de galaxies

Gaz chaud émettant des
rayons X



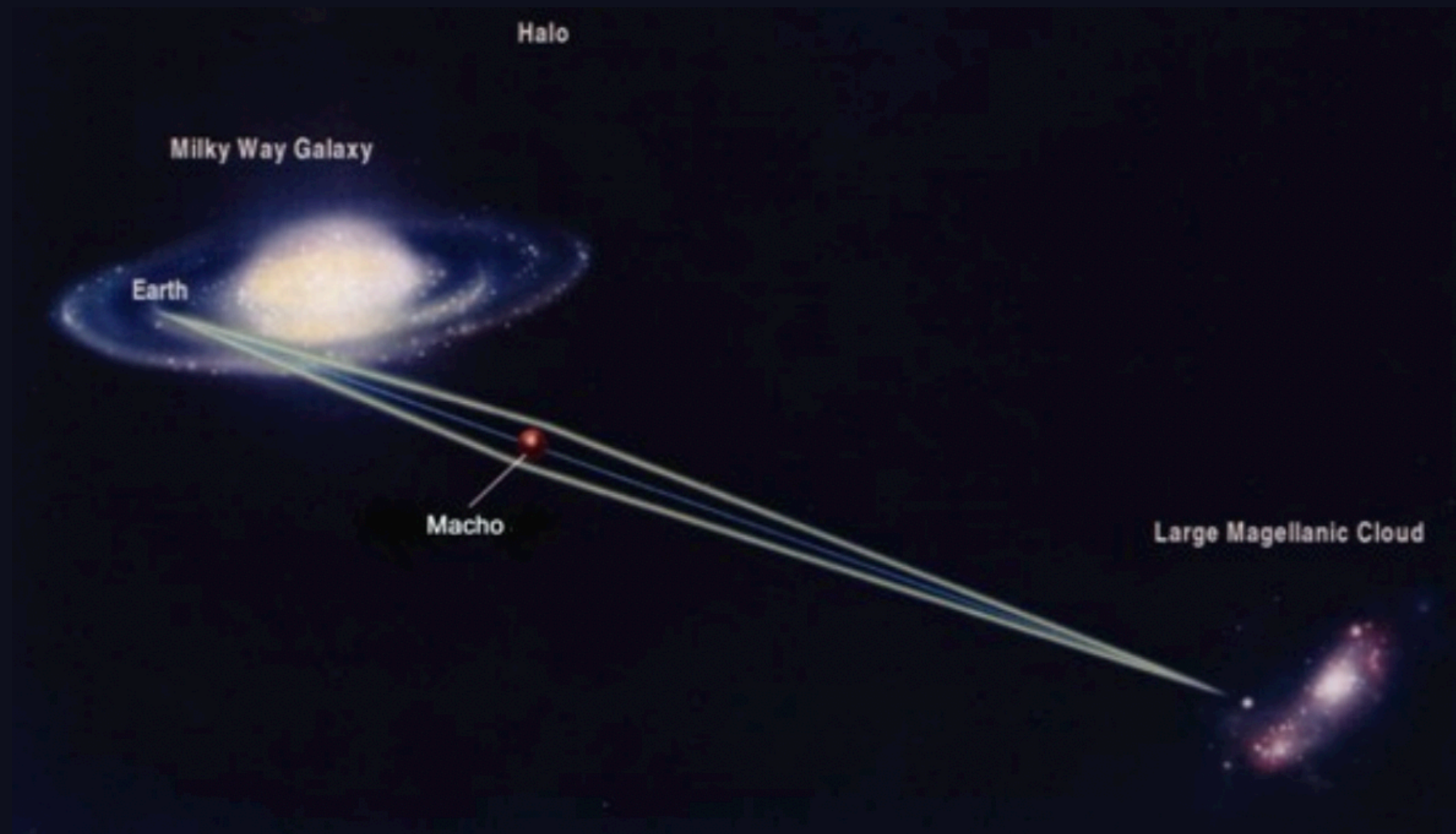
Une solution au problème de la masse manquante ?
Non, car il faut justement de la matière noire pour le retenir !

esa
XMM-Newton Space Telescope

Quelle est la nature de la matière noire ?

La nature de la matière noire : des objets compacts massifs ?

Massive astrophysical compact halo objects (MACHOS): trous noirs, étoiles à neutrons, naines brunes, planètes errantes



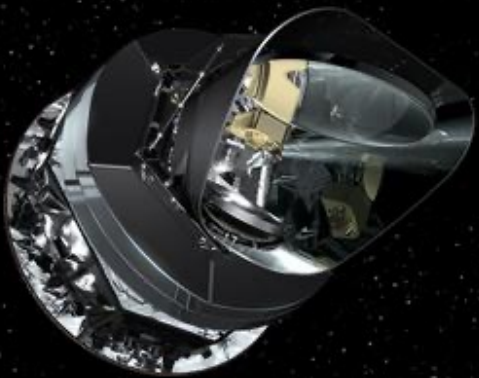
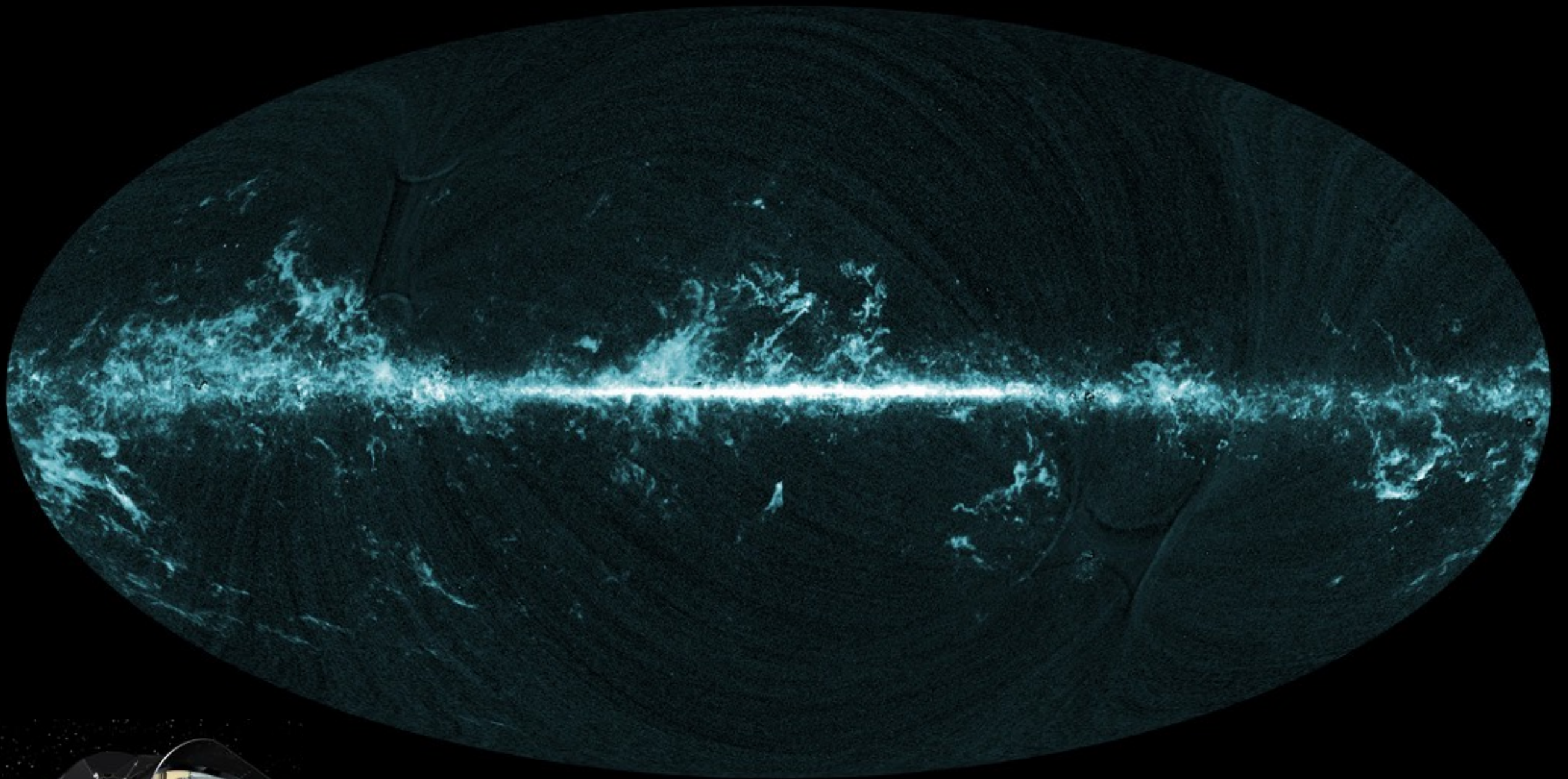
Des millions d'étoiles ont été observées dans l'espoir de voir l'effet de micro-lentille gravitationnelle des MACHOS du halo de la Voie Lactée, sans succès...

Ils ne pourraient constituer plus de 10% de la masse du halo de la Voie Lactée (EROS), mais des expériences sont toujours en cours (SuperMACHO, POINT-AGAPE, MEGA, WeCapp)...

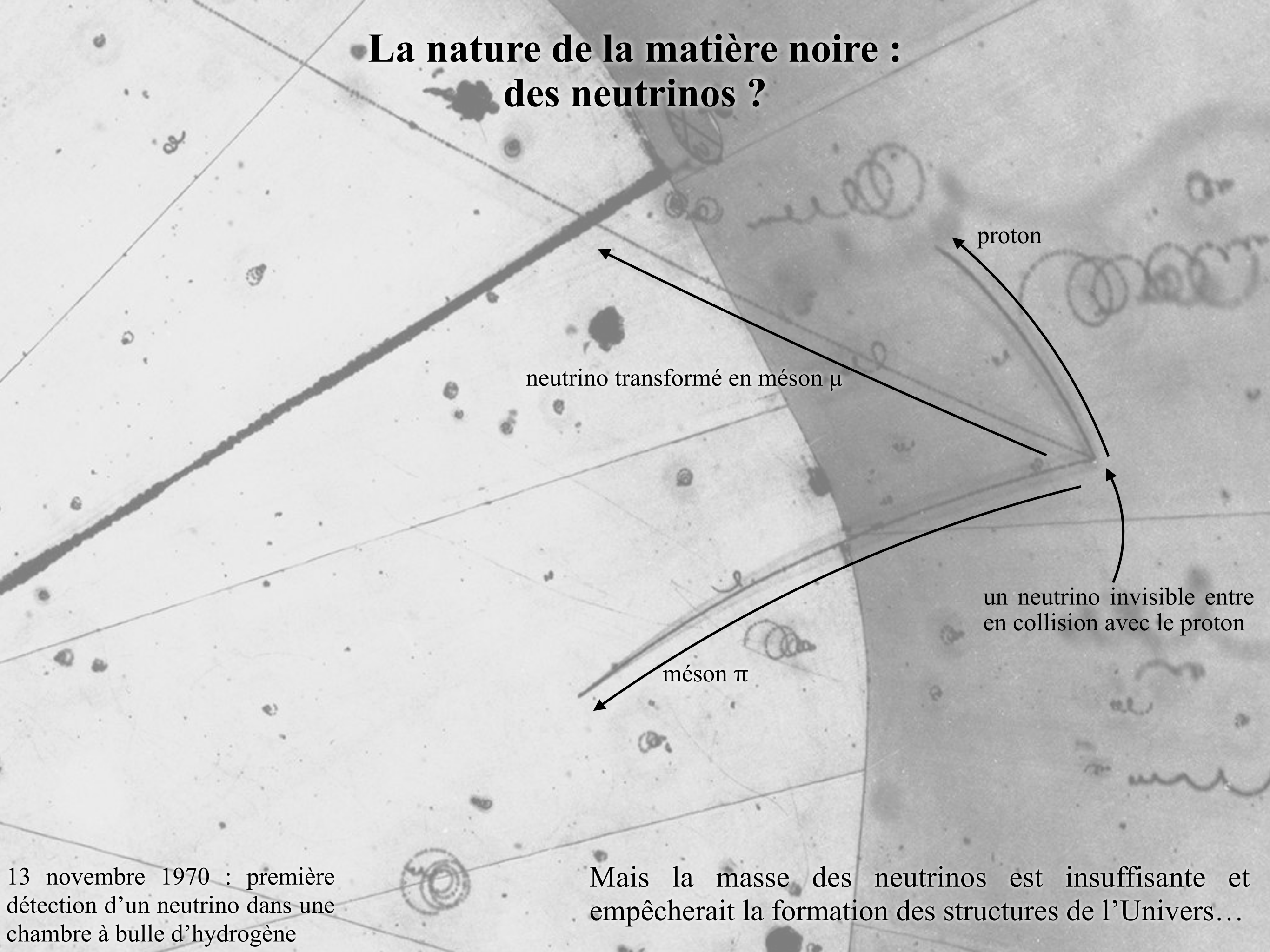
La nature de la matière noire : des trous noirs de taille stellaire ?



La nature de la matière noire : des nuages de gaz froid ?



La nature de la matière noire : des neutrinos ?



proton

neutrino transformé en méson μ

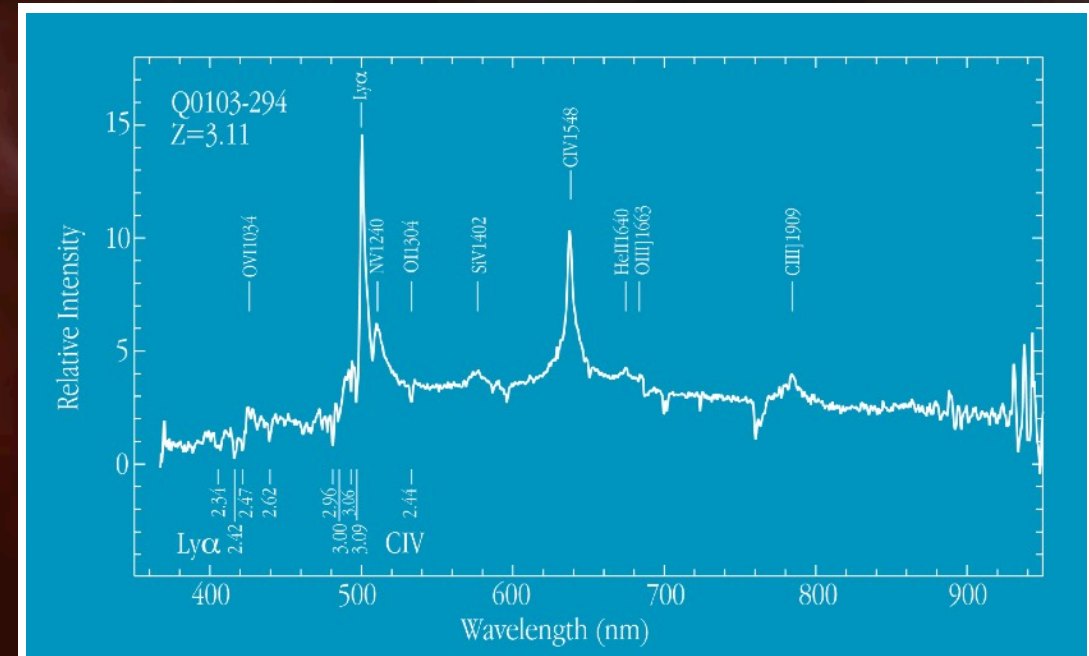
un neutrino invisible entre
en collision avec le proton

méson π

13 novembre 1970 : première
détection d'un neutrino dans une
chambre à bulle d'hydrogène

Mais la masse des neutrinos est insuffisante et
empêcherait la formation des structures de l'Univers...

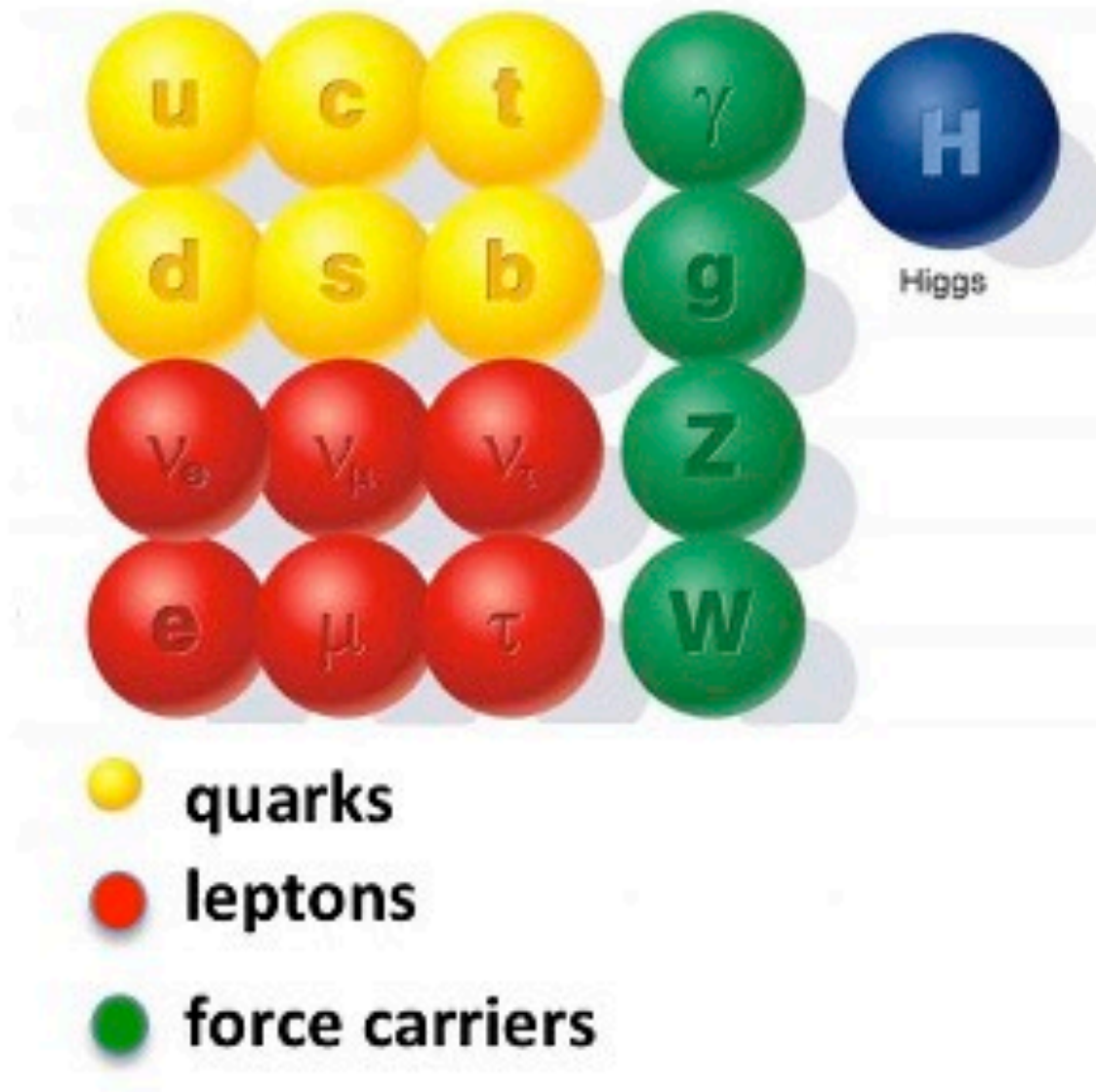
La nature de la matière noire : les quasars lointains montrent qu'elle doit être exotique !



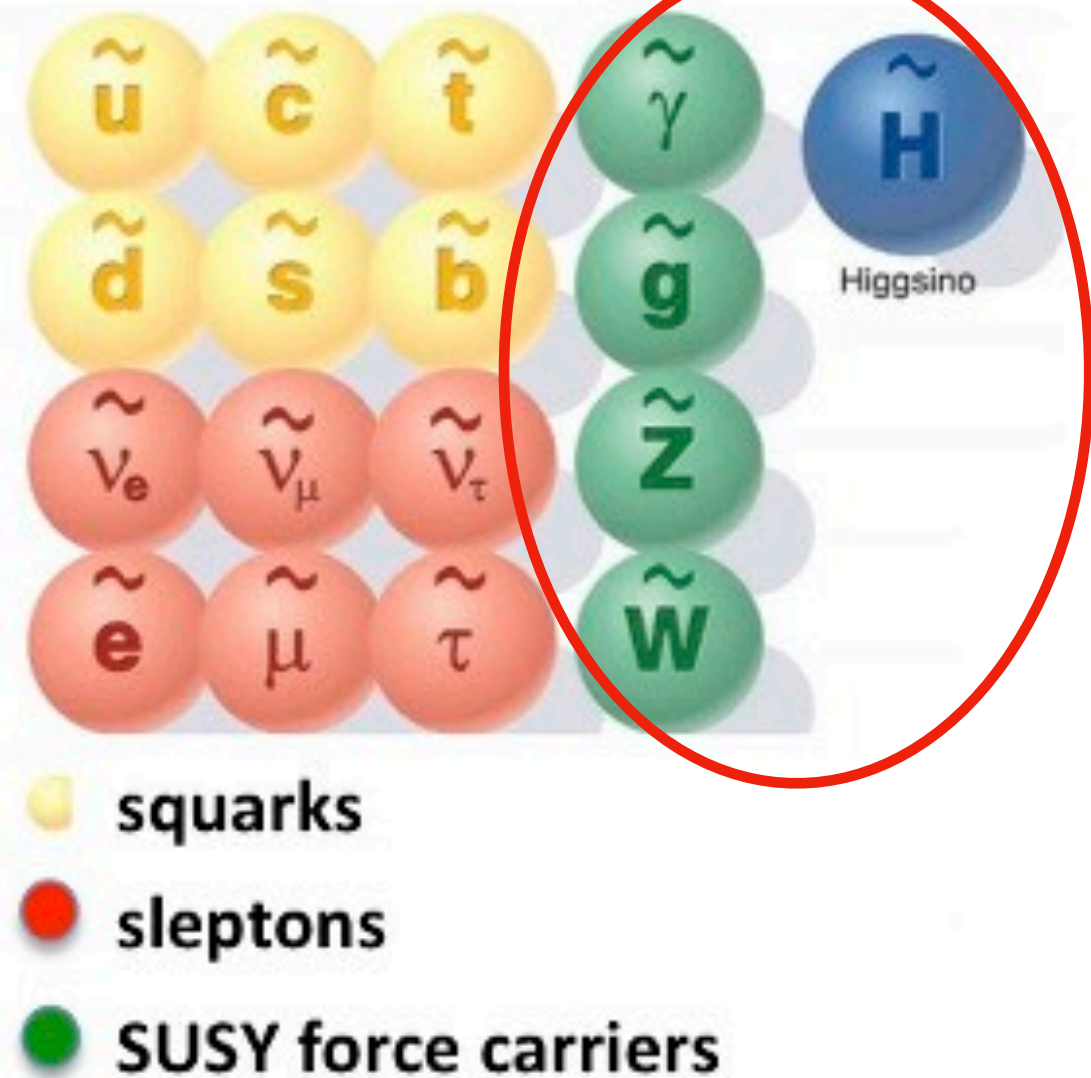
Nucléosynthèse primordiale : l'abondance des éléments dépend de la quantité de matière baryonique dans l'Univers.

La nature de la matière noire : les WIMPs ?

Particules connues du modèle standard de la physique des particules



Particules supersymétriques hypothétiques

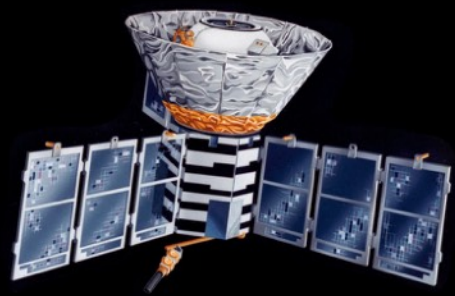
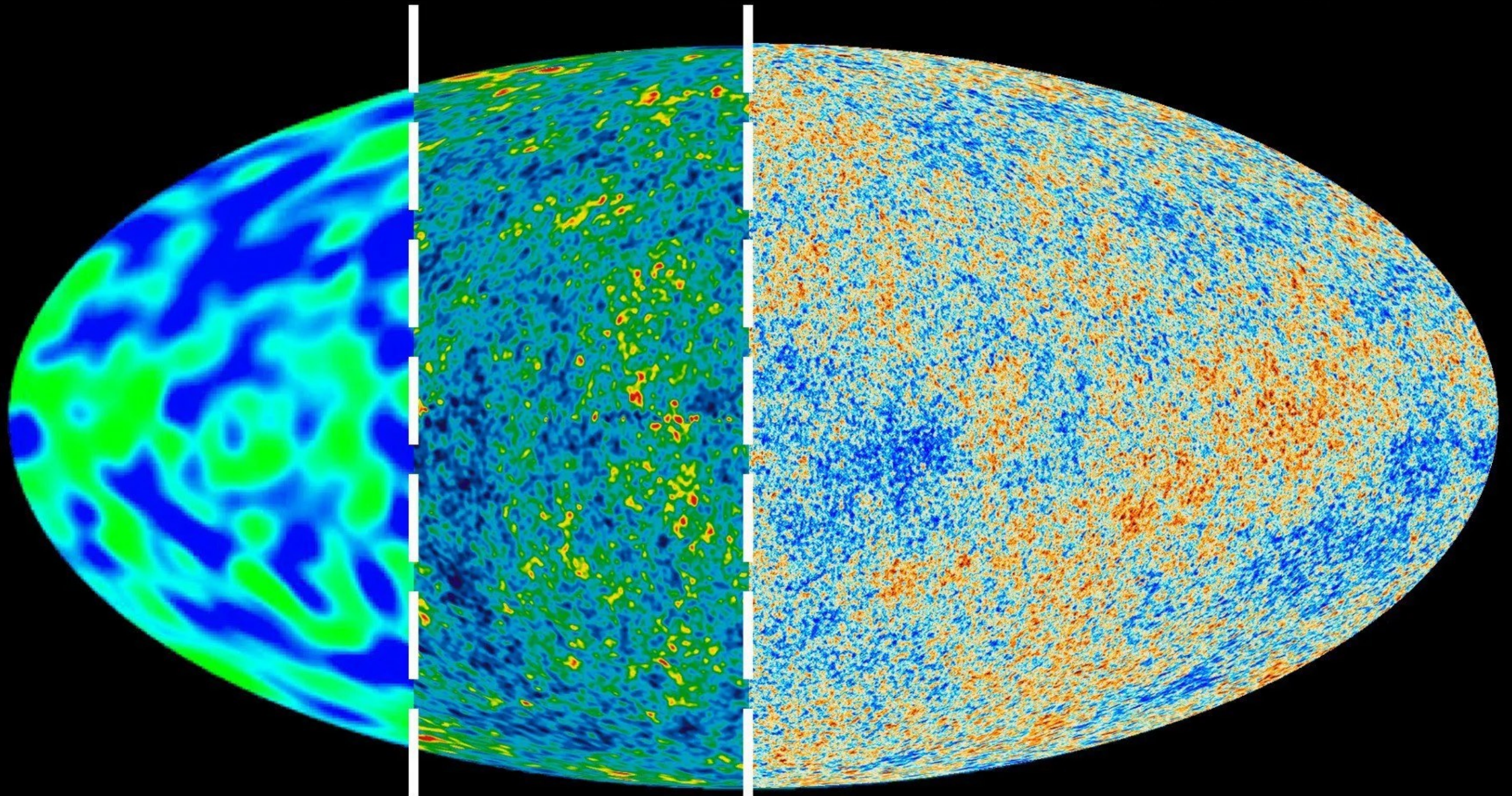


WIMPs: Weakly Interactive Massive Particles

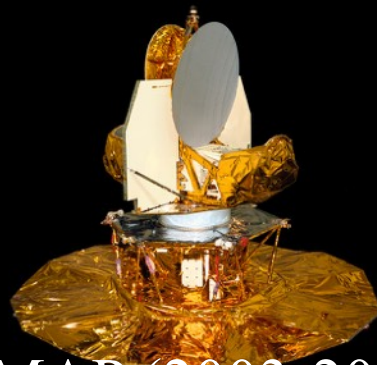
La nature de la matière noire : les WIMPS ?



La nature de la matière noire : le fond diffus cosmologique fixe la composition de l'Univers



COBE (1989-1993)

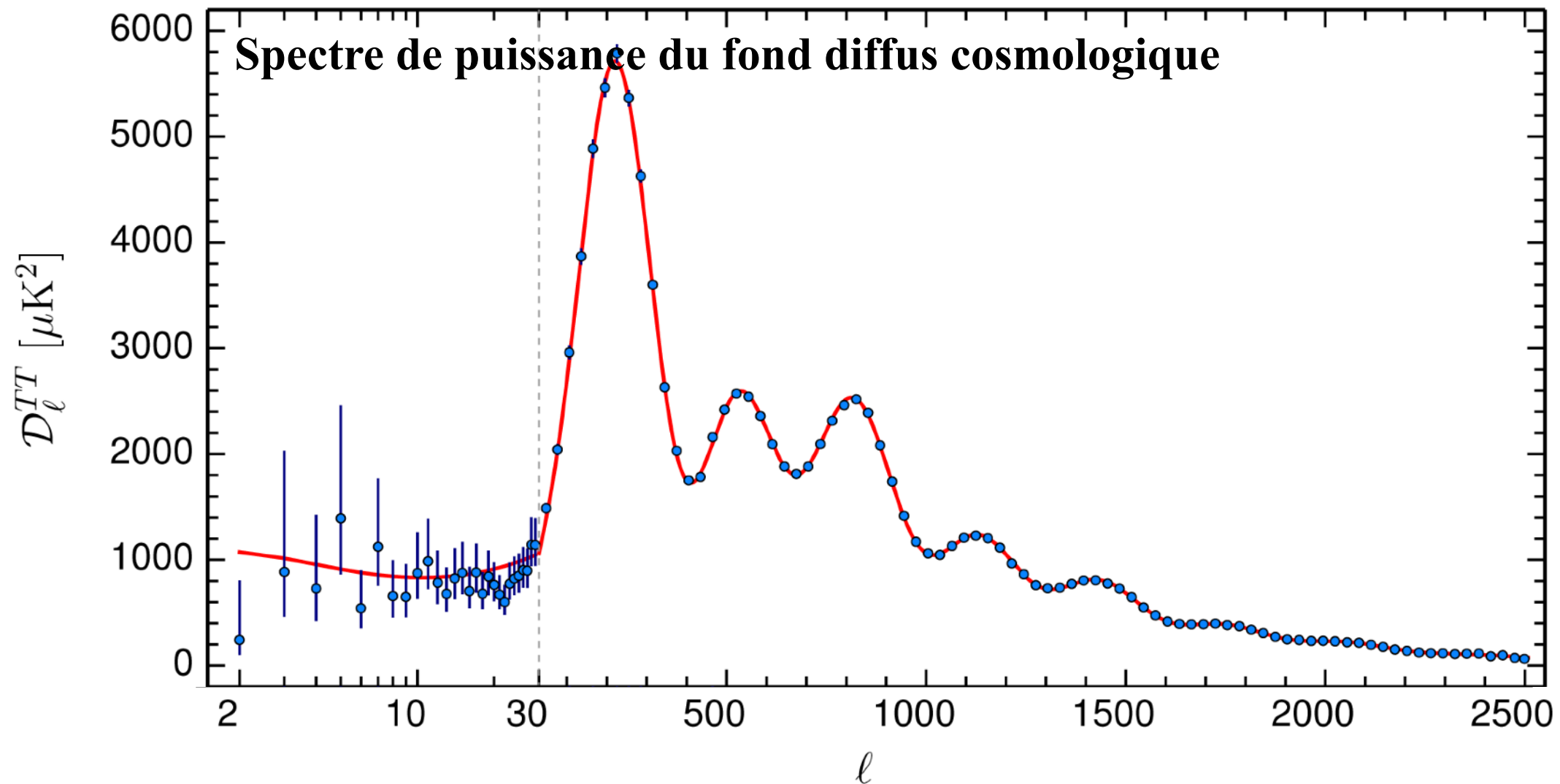


WMAP (2003-2012)

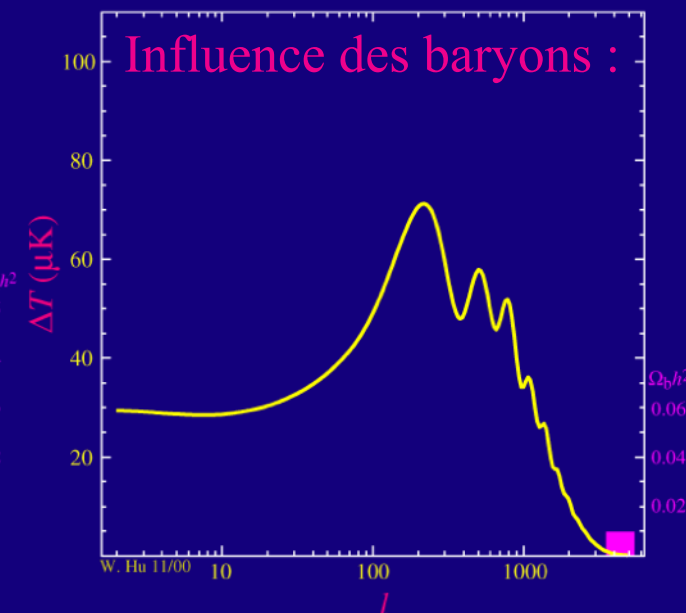
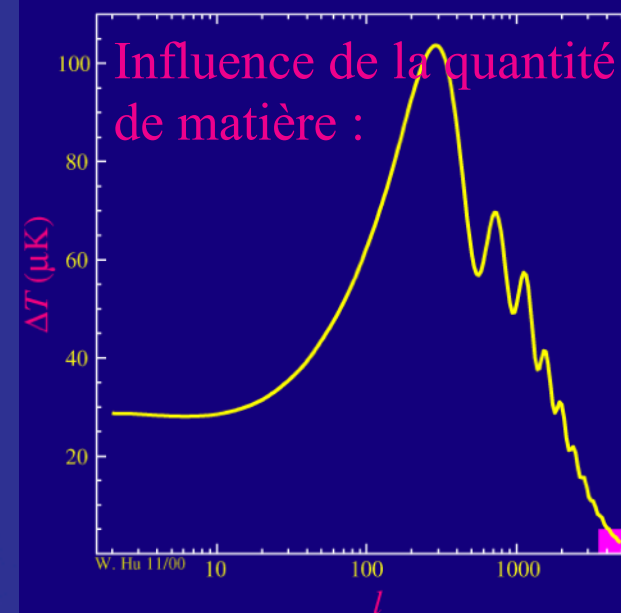
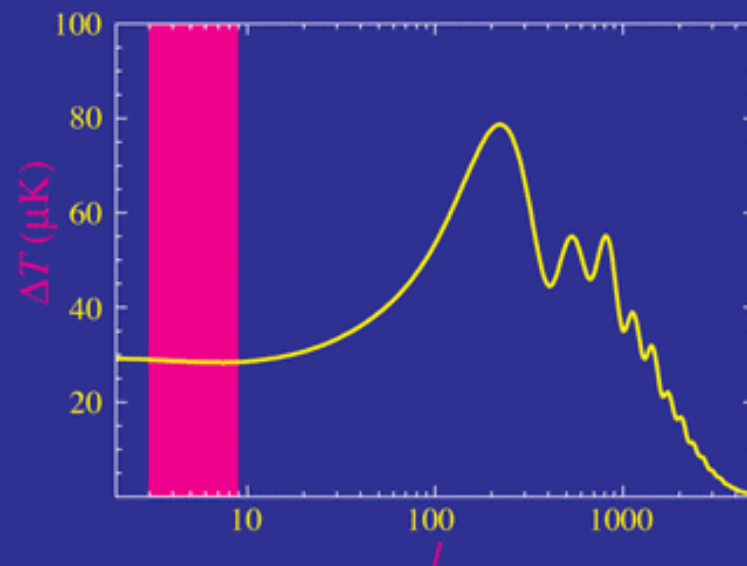
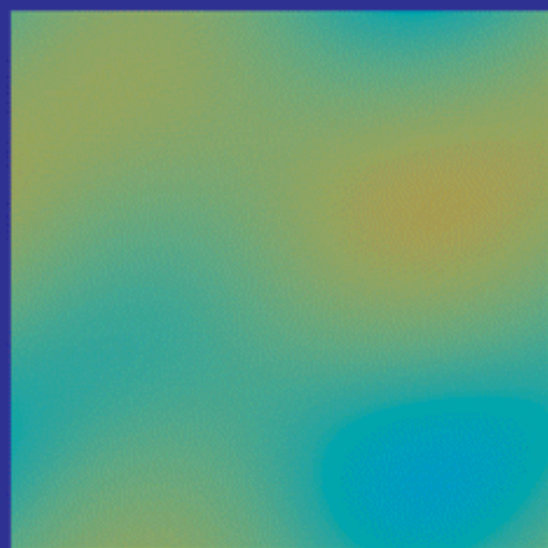


Planck (2009-2013)

La nature de la matière noire : le fond diffus cosmologique fixe la composition de l'Univers



Amplitude des fluctuations à différentes échelles :



Le modèle cosmologique

Les modèles cosmologiques issus de la relativité générale

Les équations d'Einstein

$$G^{\mu\nu} = E^{\mu\nu} + \Lambda g^{\mu\nu}$$

$G^{\mu\nu}$: tenseur décrivant la matière

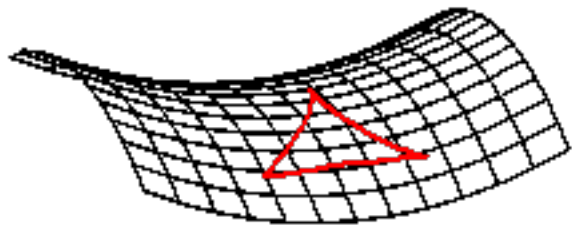
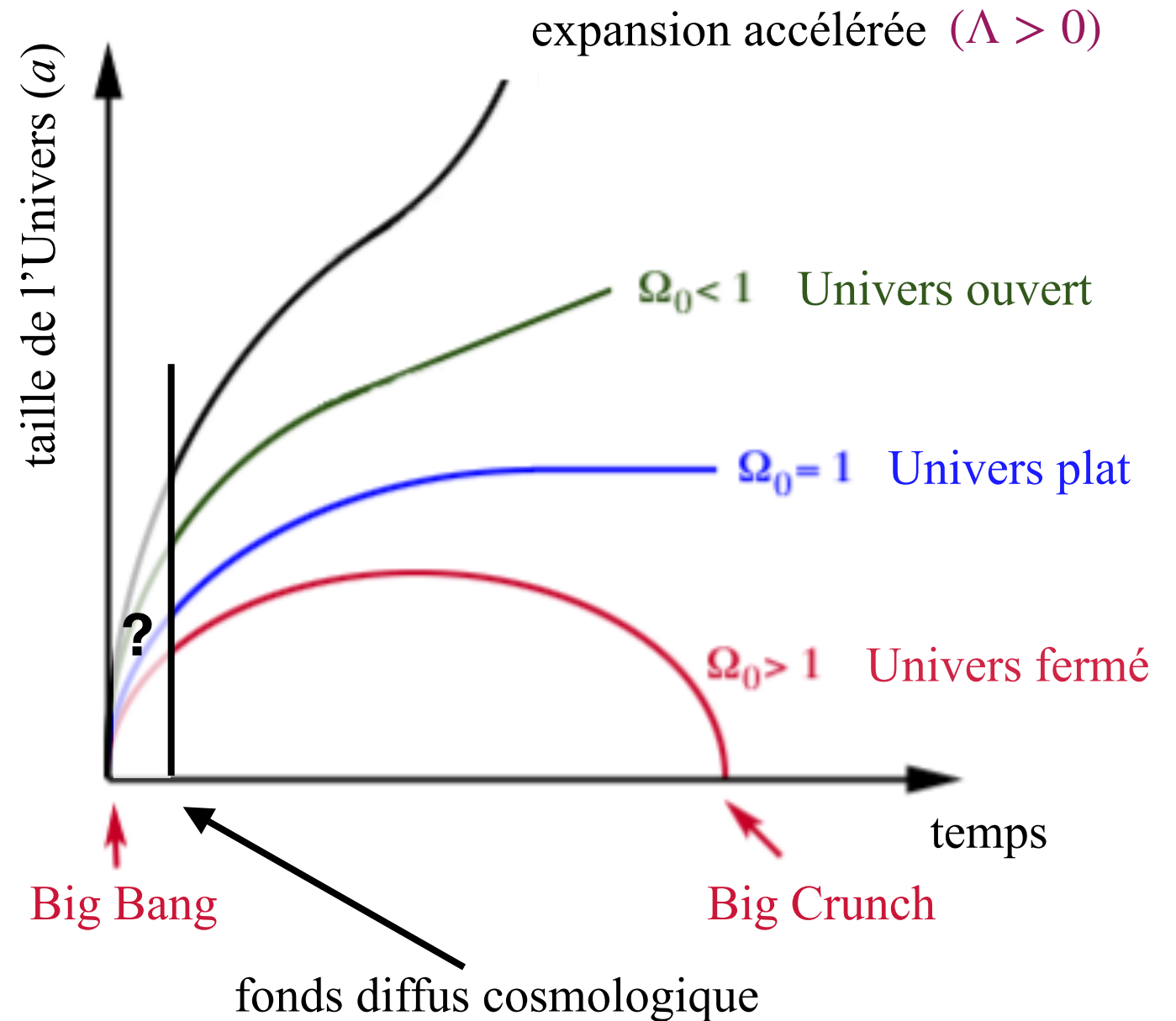
$E^{\mu\nu}$: tenseur décrivant l'espace-temps

Λ : constante cosmologique

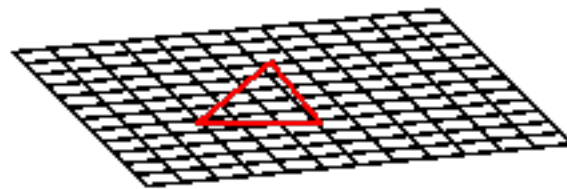
Les équations de Friedmann

$$\begin{cases} \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \end{cases}$$

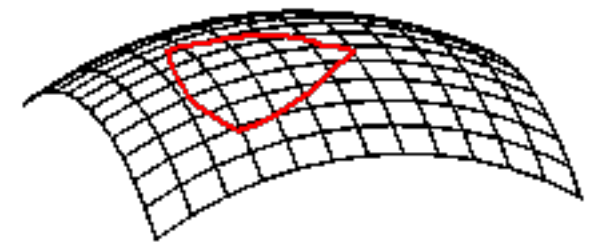
Le facteur d'échelle a décrit l'expansion de l'Univers



Univers ouvert : ressemble à une selle de cheval

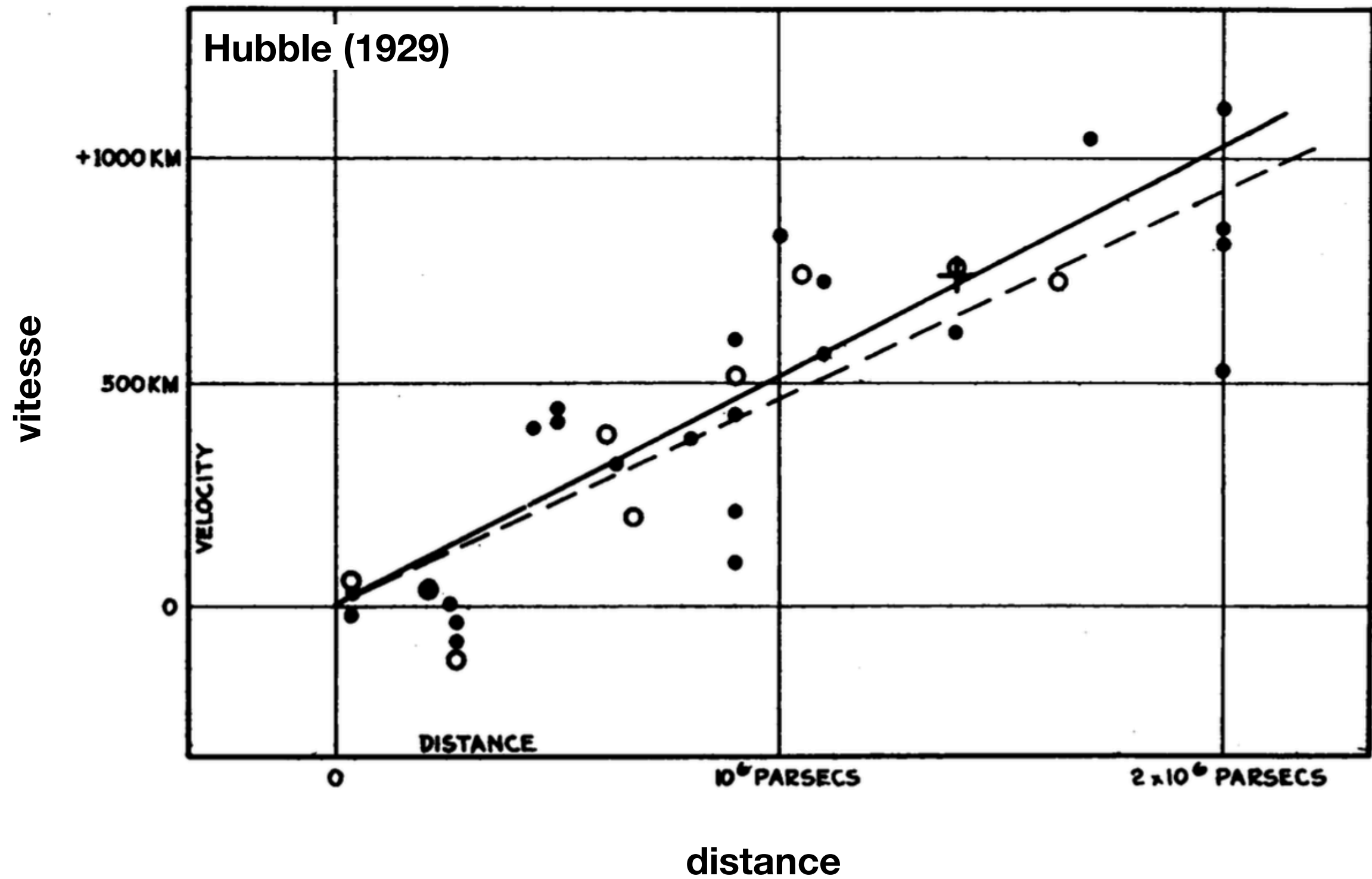


Univers plat



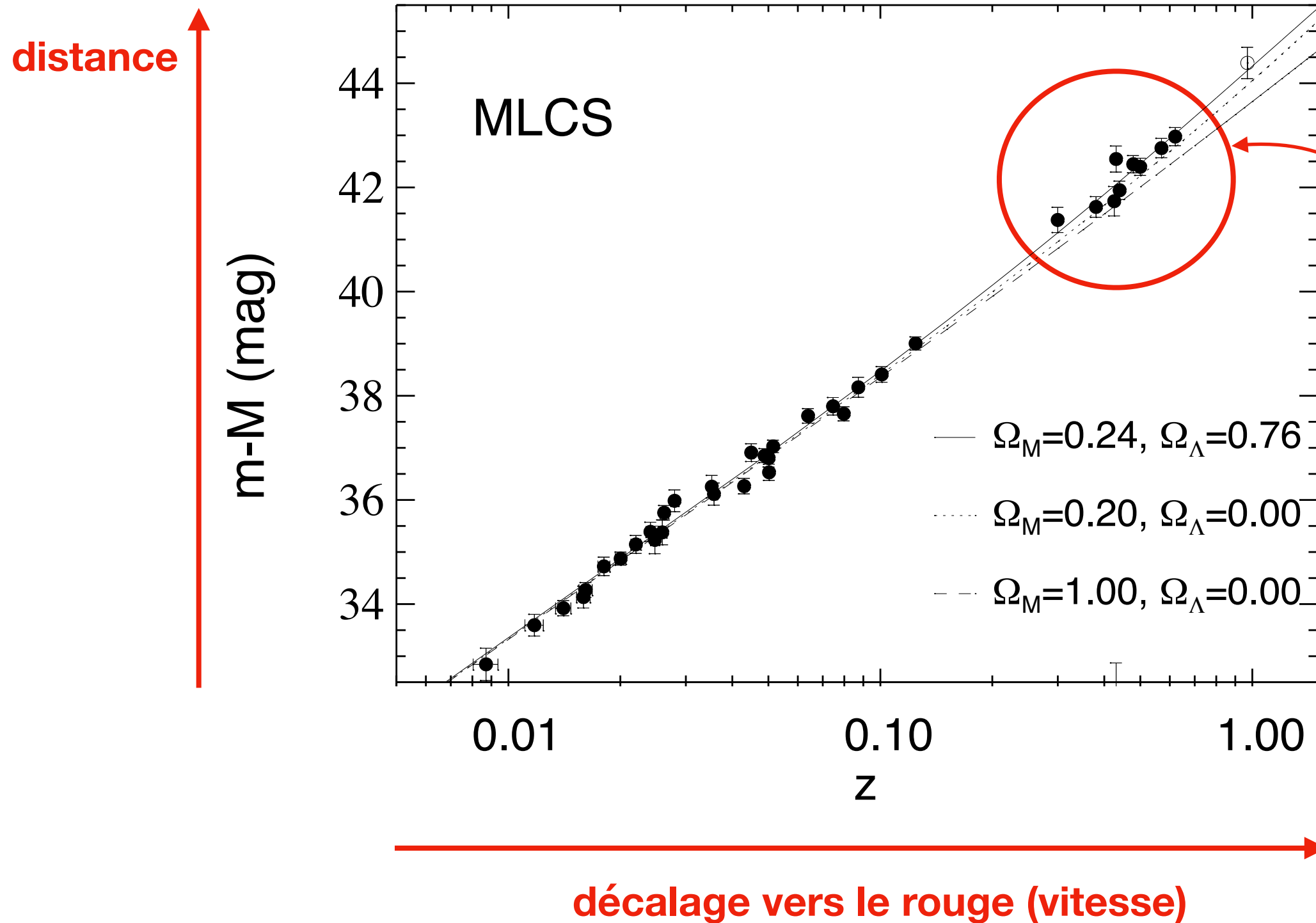
Univers fermé : semblable à la surface d'une sphère

Un univers en expansion



(1 parsec = $3.09 \cdot 10^{16}$ m)

Un univers en expansion accélérée !

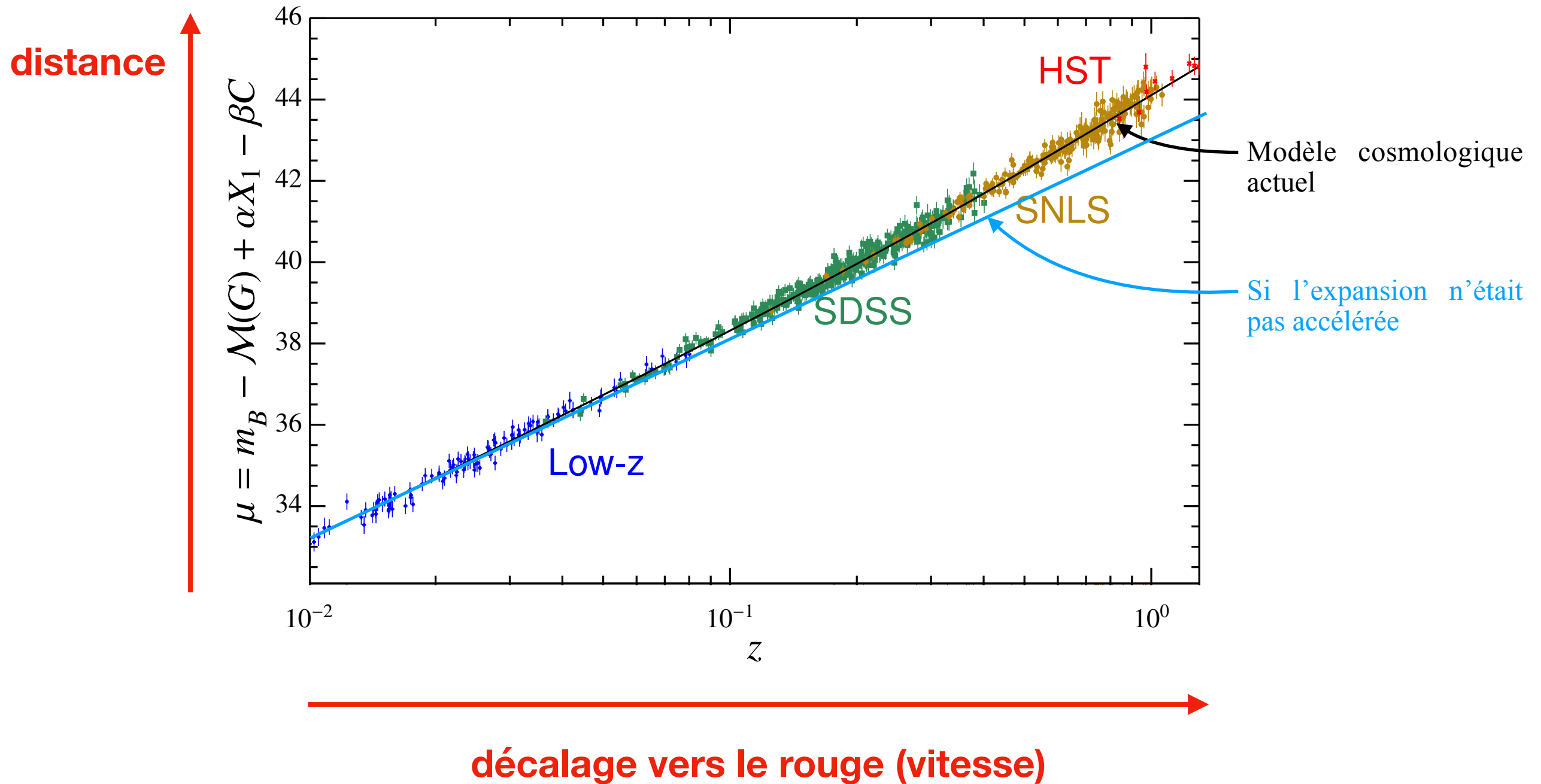


Le décalage vers le rouge de ces points distants est plus petit qu'attendu vu les points les plus proches...

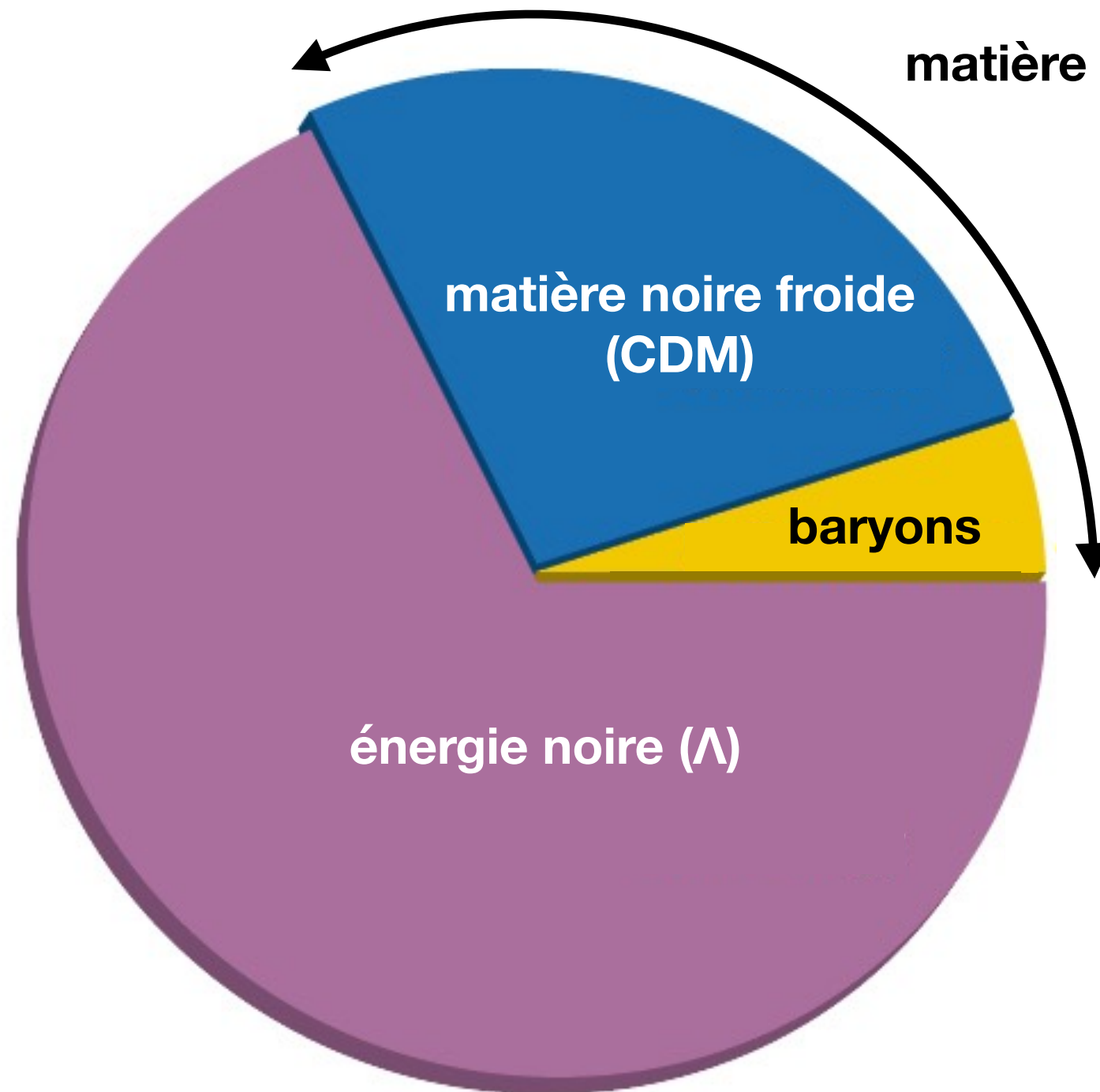
Leur vitesse est donc plus petite qu'attendu.

L'expansion s'est accélérée depuis.

Un univers en expansion accélérée !



La composition de l'Univers dans le modèle Λ CDM



Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 4 (31/01/23) : Succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

Matière noire : mirage ou réalité ?

Cours 1 (10/01/23) : Peser l'Univers grâce à la loi de la gravitation

- Modéliser le mouvement des astres : Ptolémée, Copernic, Newton, Einstein
- Mesurer la masse de la Terre et du Soleil
- Découvrir l'invisible: Neptune, les exoplanètes, le trou noir central de notre Galaxie

Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire

- La galaxie d'Andromède à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les différents types de galaxies
- Les courbes de rotation des galaxies et la matière noire

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide

- Les différentes indications en faveur de la matière noire
- A la recherche de la masse manquante : gaz, MACHOs, trous noirs, neutrinos, WIMPS, etc.
- Le fond diffus cosmologique, la nucléosynthèse primordiale et l'expansion de l'Univers
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 4 (31/01/23) : Succès et défis du modèle cosmologique actuel

- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et les phénomènes de rétroaction
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide

- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée