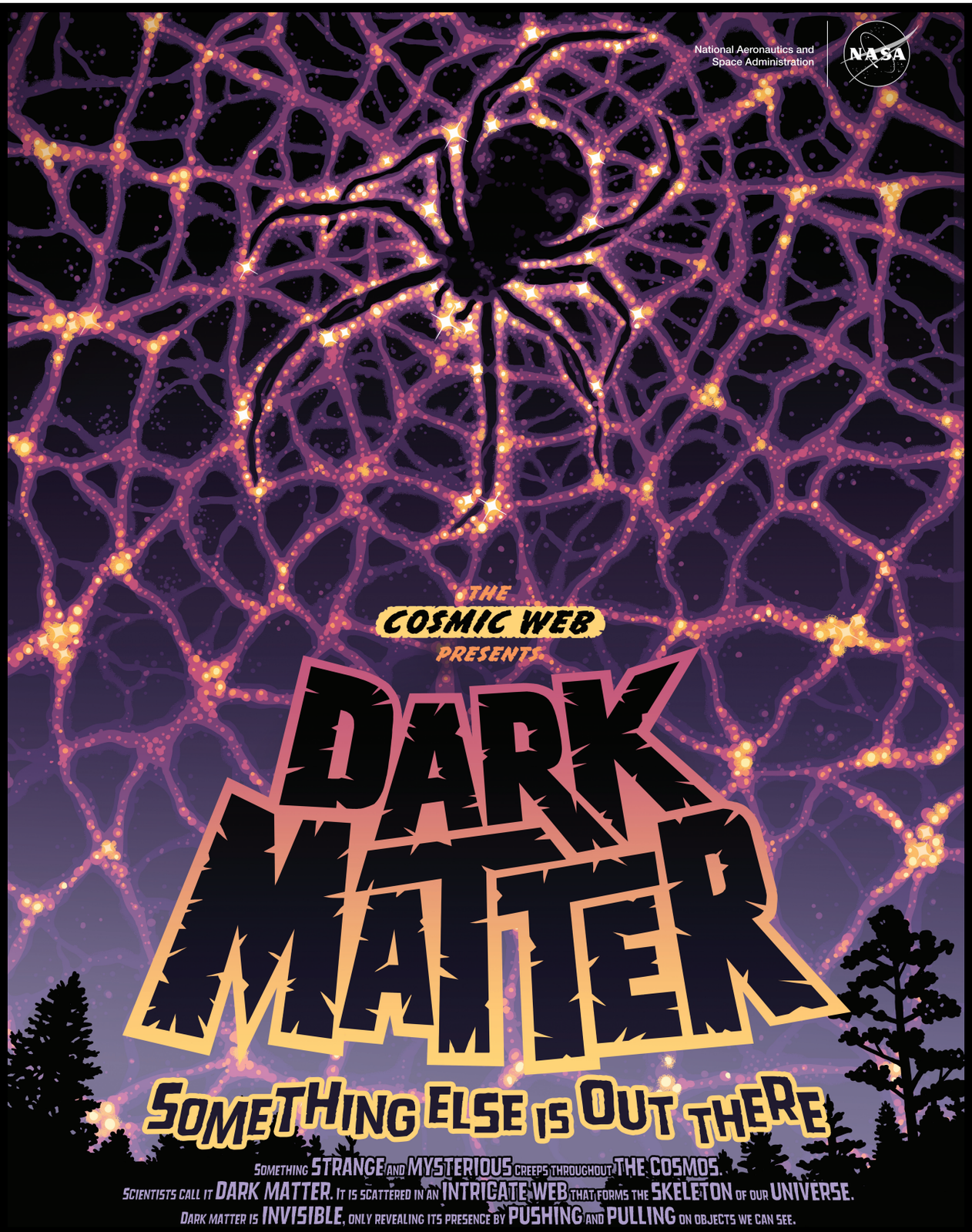
Jonathan Freundlich

Physique pour Tous !

jfreundlich@unistra.fr

Matière noire : mirage ou réalité ?



Observatoire astronomique de Strasbourg | ObAS

Jonathan Freundlich **Physique pour Tous !** jfreundlich@unistra.fr

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 : Ptolemée, 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

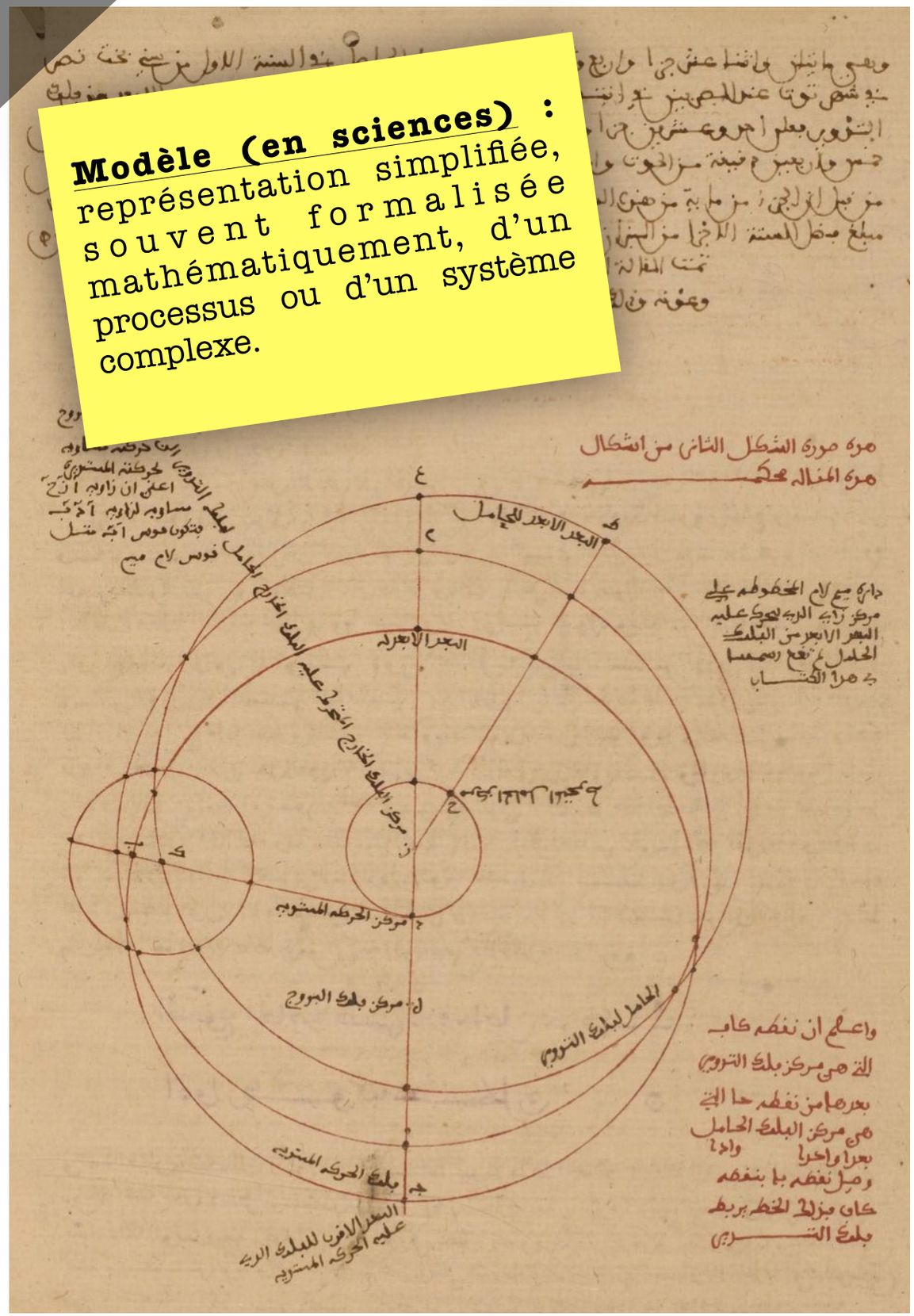
Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire
- Les galaxies à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les courbes de rotation des galaxies
- A la recherche de la masse manquante : gaz, trous noirs, neutrinos, etc.
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide
- Le Big Bang, la nucléosynthèse primordiale et le fonds diffus cosmologique
- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et des galaxies et les phénomènes de rétroaction

Cours 4 (31/01/23) : Les défis du modèle cosmologique actuel
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- L'énergie noire et la constante de Hubble

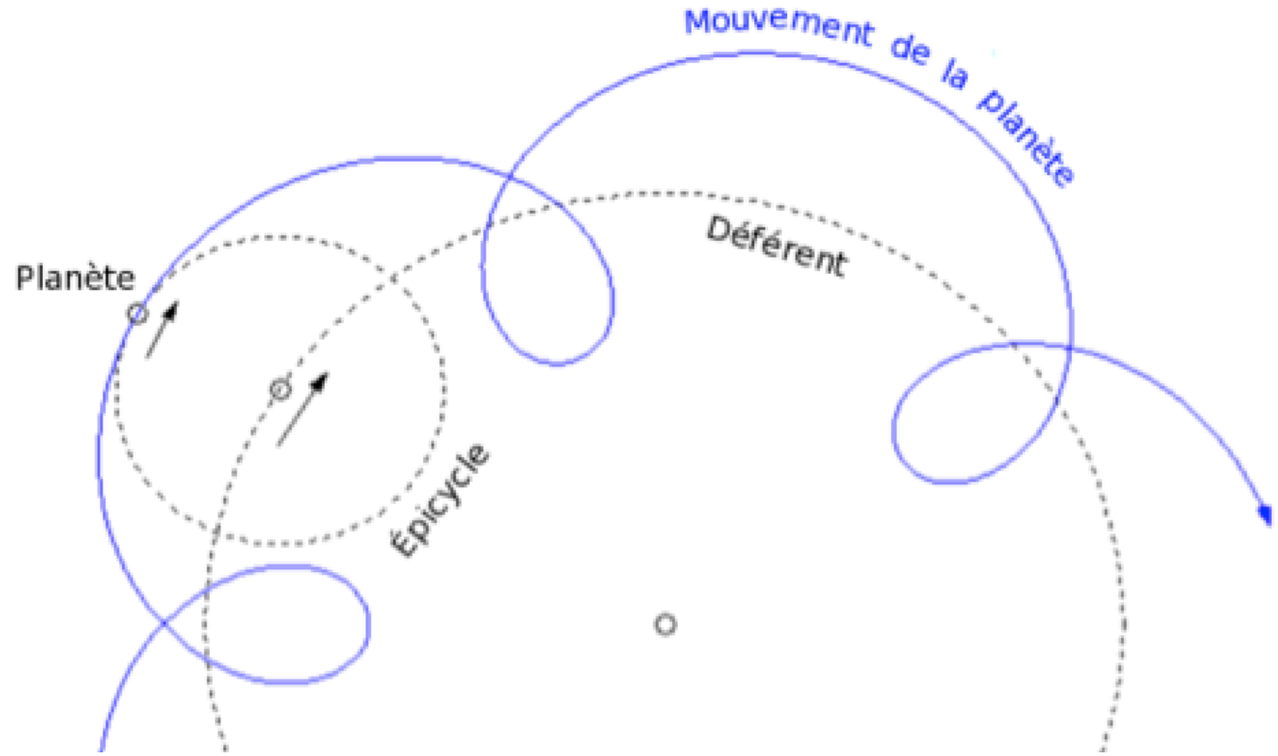
Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

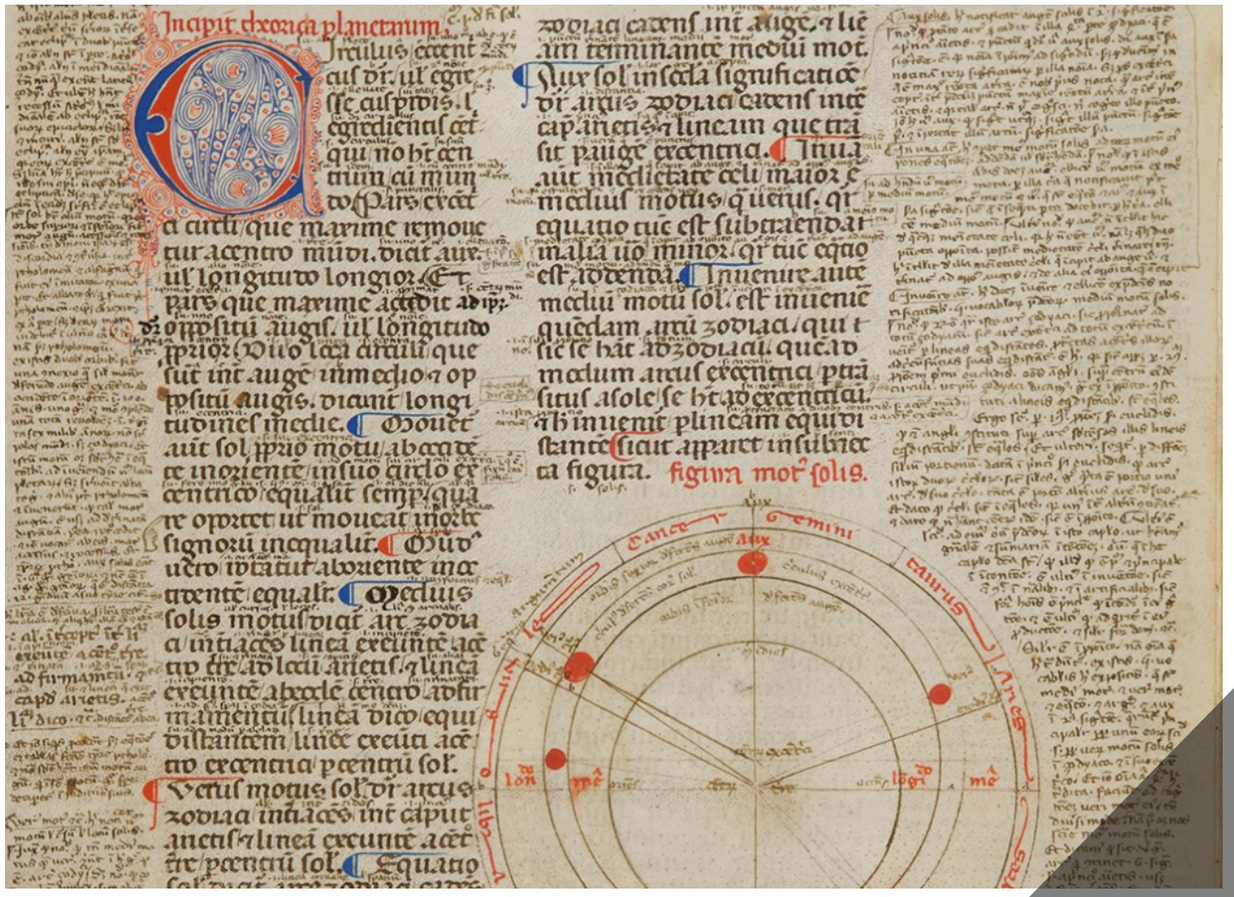
Le modèle géocentrique de Ptolémée (~100-168)



Modèle (en sciences) : représentation simplifiée, souvent formalisée mathématiquement, d'un processus ou d'un système complexe.

Almageste, Espagne, 1381

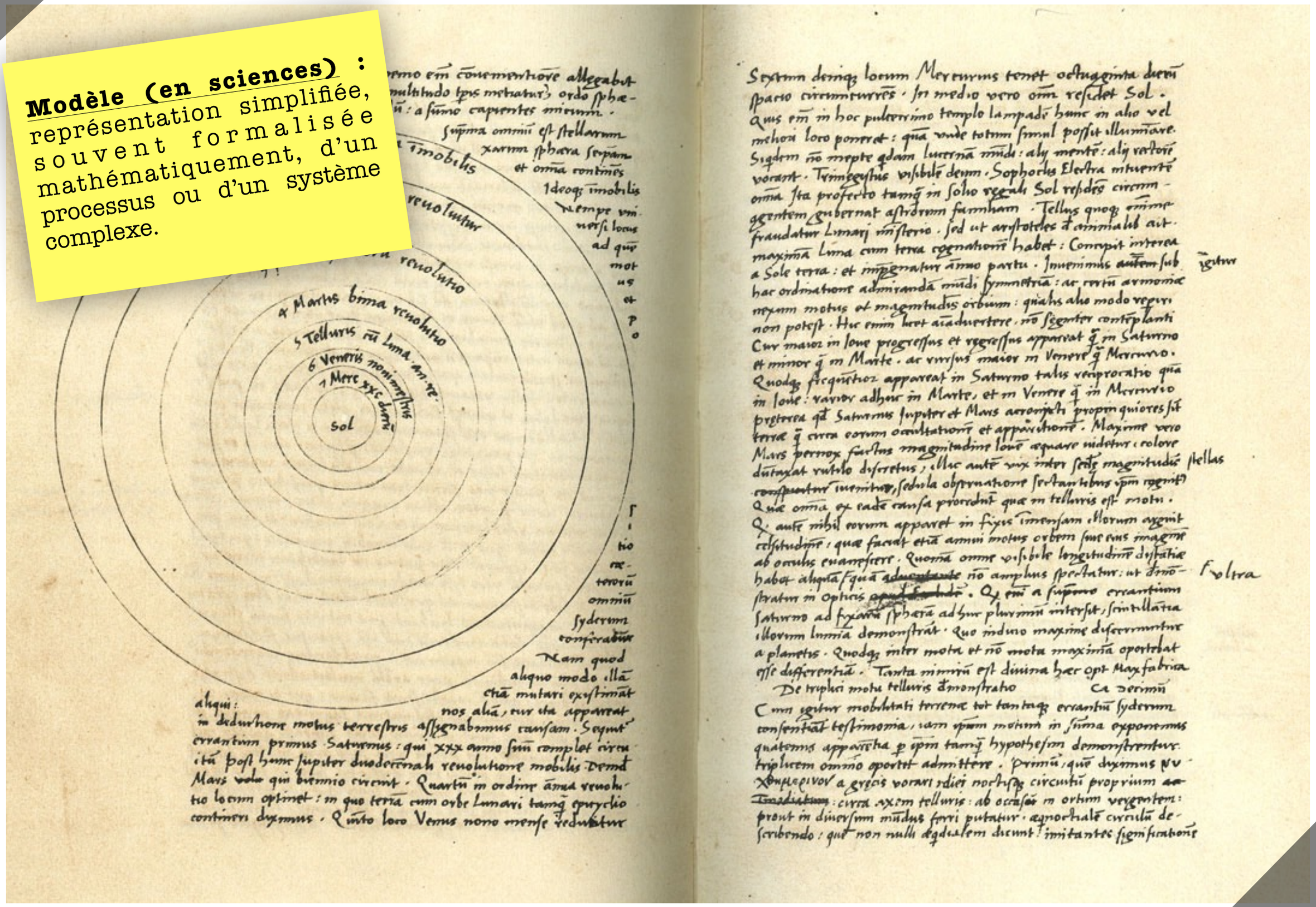




Traduction de l'arabe par Gérard de Clermont, 1200

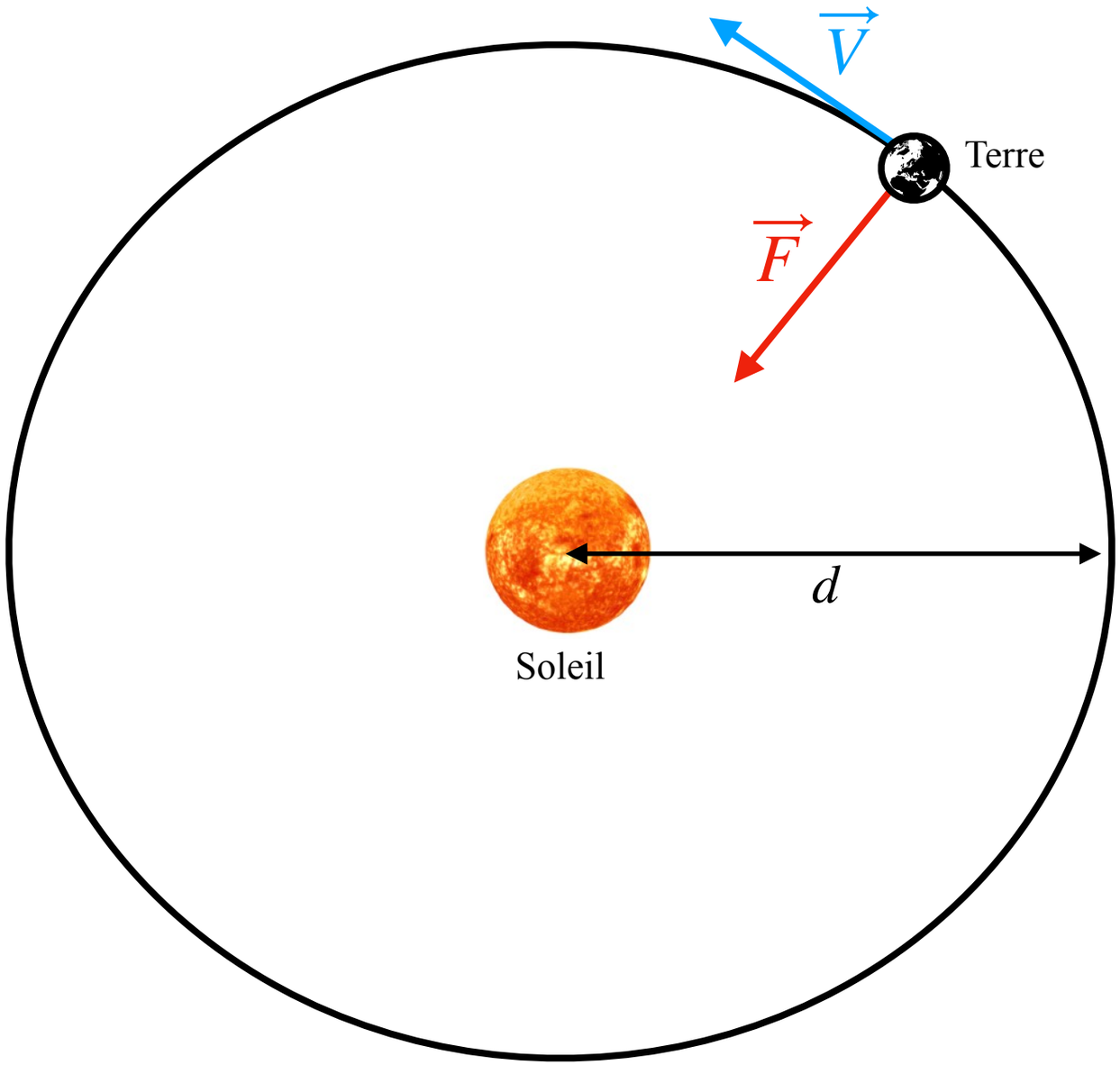
Le modèle héliocentrique de Copernic (1473-1543)

Modèle (en sciences) : représentation simplifiée, souvent formalisée mathématiquement, d'un processus ou d'un système complexe.



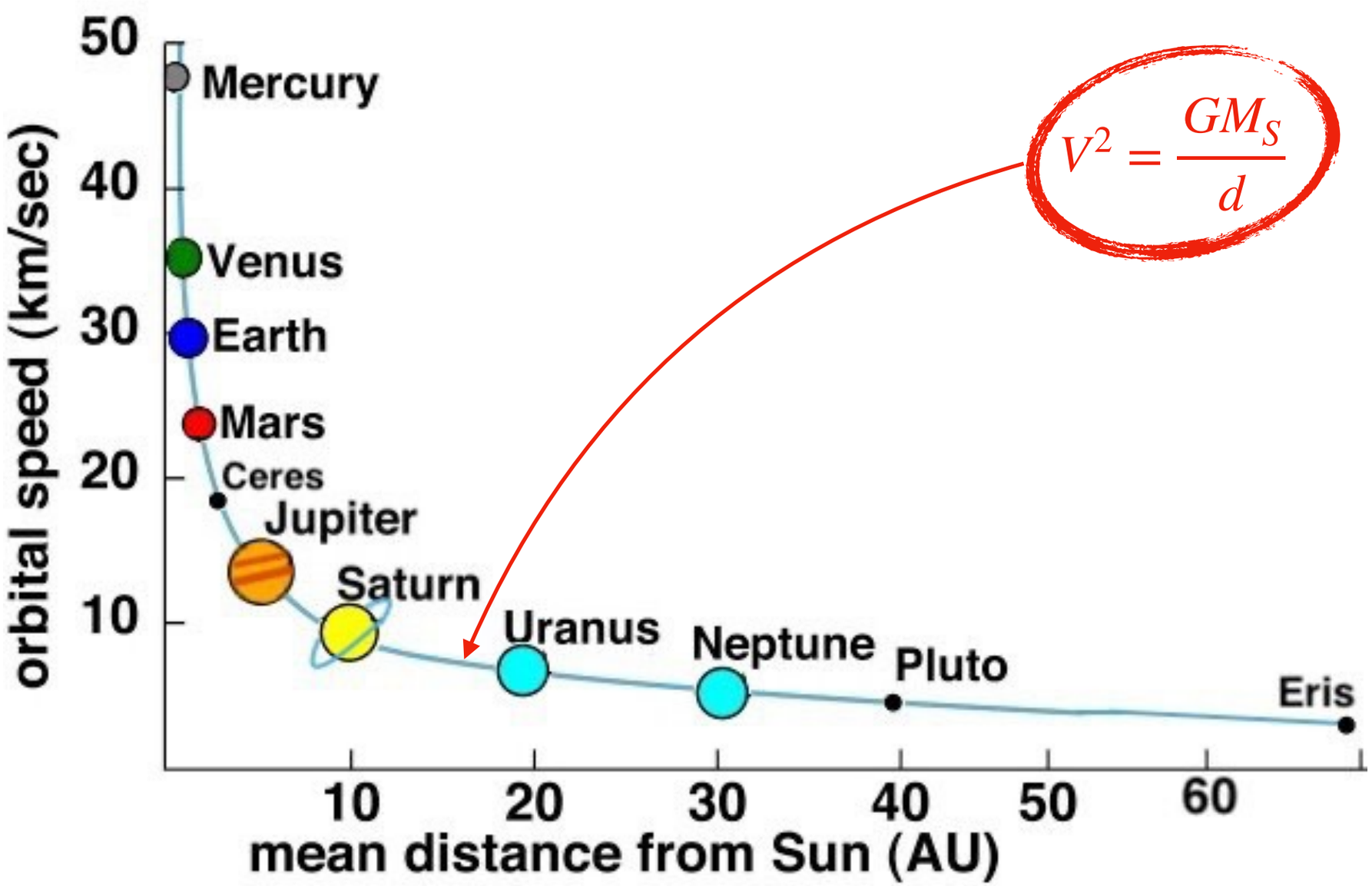
De Revolutionibus, 1520-1541

Détermination de la masse du Soleil



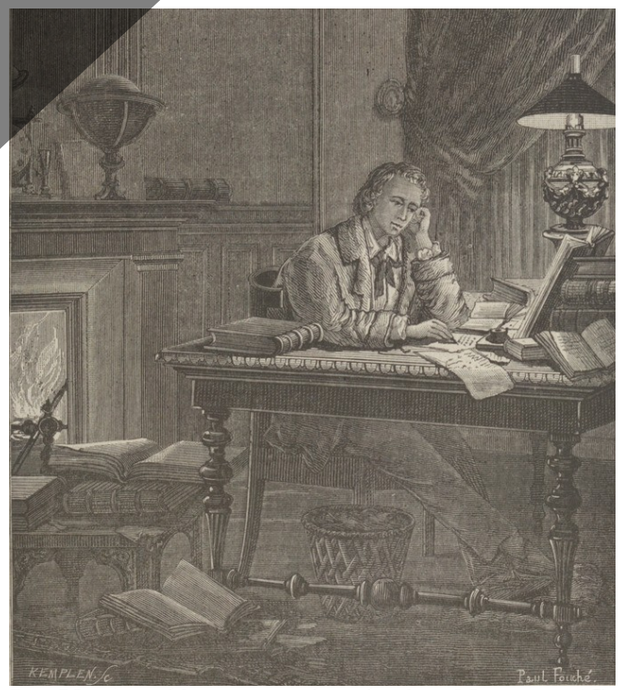
$V^2 = \dfrac{GM_S}{d}$ donne $M_S = \dfrac{d}{G}V^2$ et on trouve $M_S = 1.989 \times 10^{30}$ kg ($= 1\ M_\odot$)

Vitesse orbitale des planètes du Système Solaire

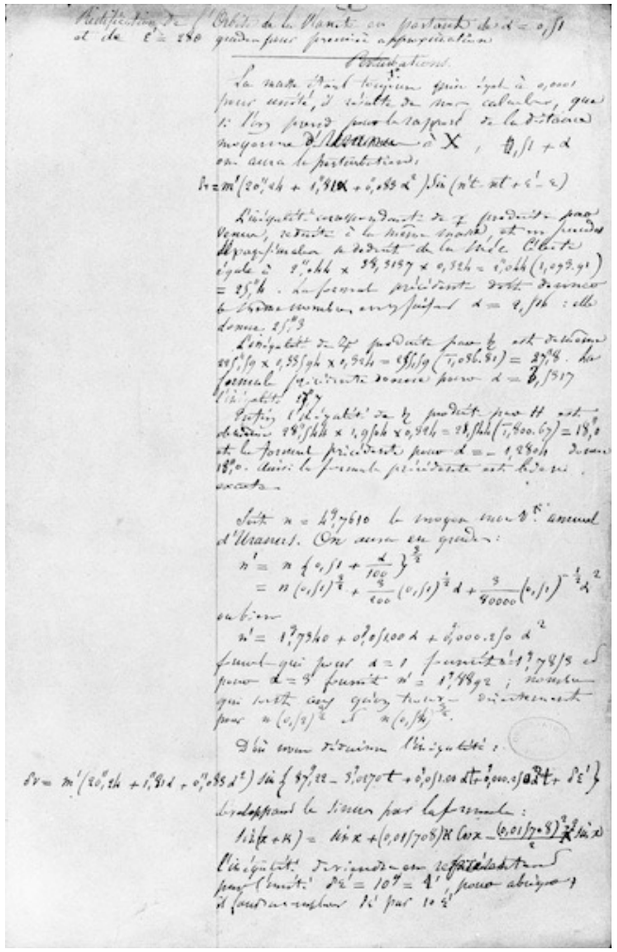


$$V^2 = \frac{GM_S}{d}$$

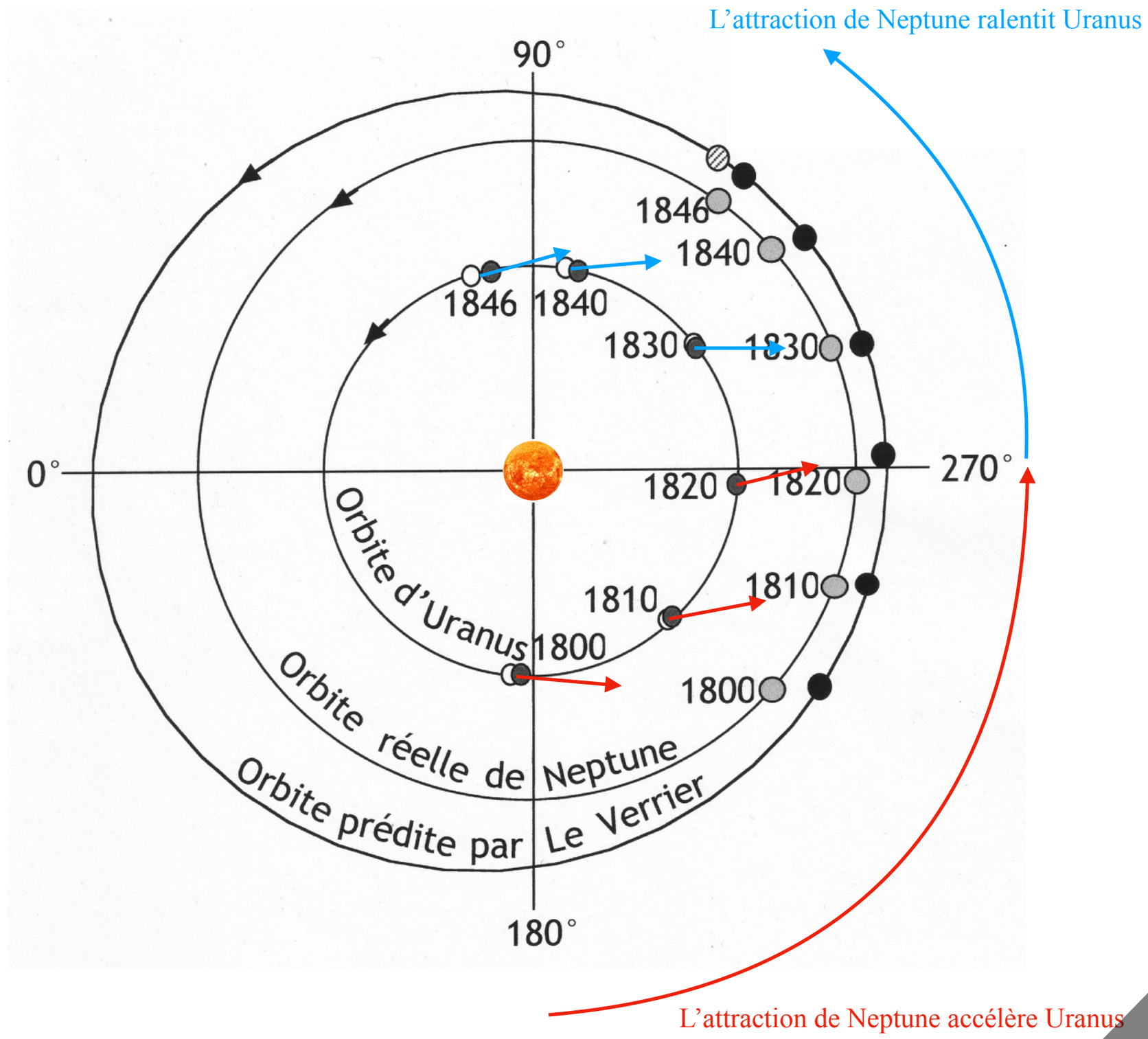
La découverte de Neptune (Urbain le Verrier, 1846)



Le Verrier découvrant la planète Neptune (C. Flammarion, Astronomie Populaire, 1884)



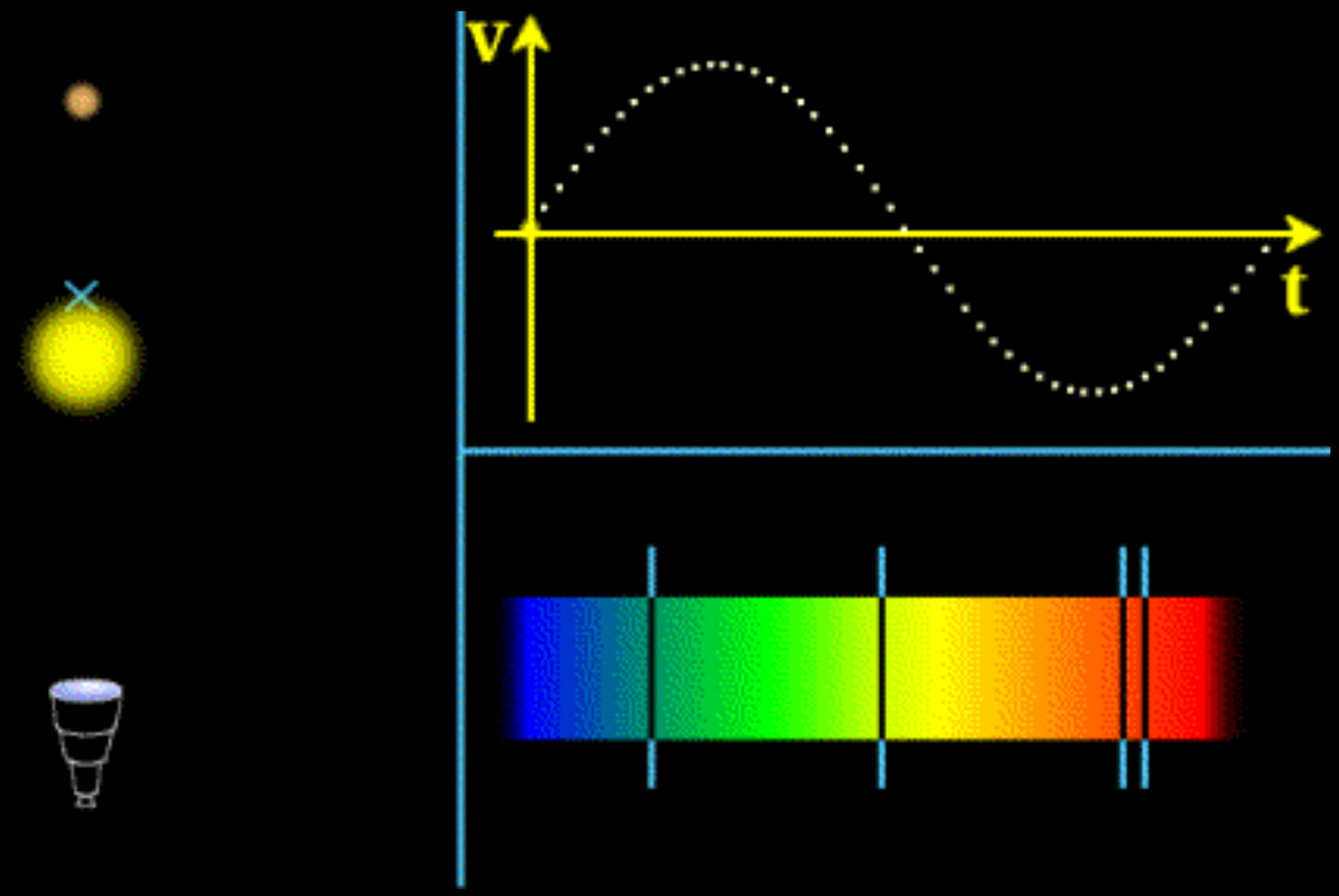
Page de calculs de Le Verrier (1846)



● Positions observées d'Uranus de 1800 à 1846

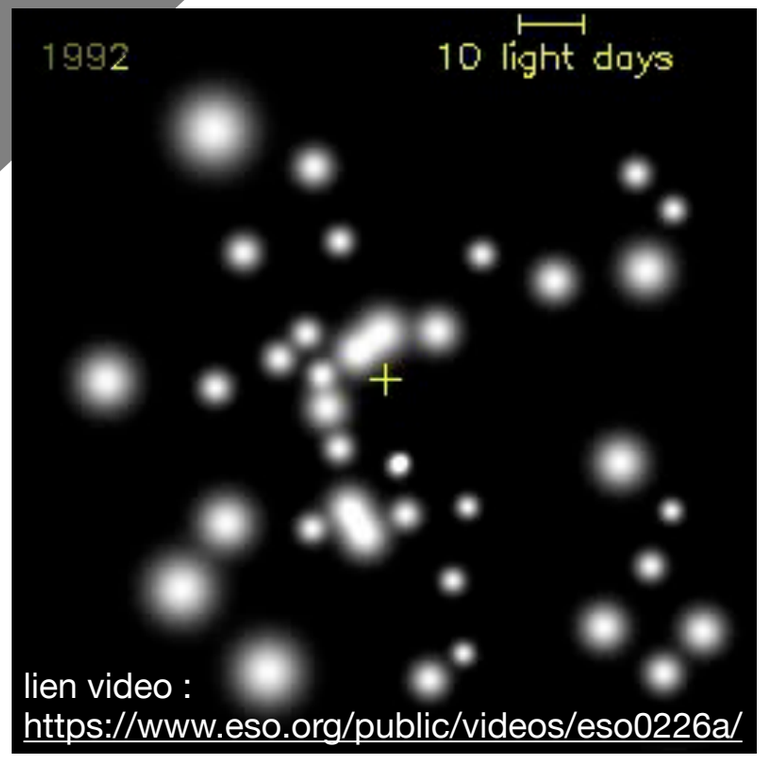
○ Positions qu'Uranus aurait dû occuper sans Neptune

Détecter et mesurer la masse des exoplanètes
avec la méthode des vitesses radiales

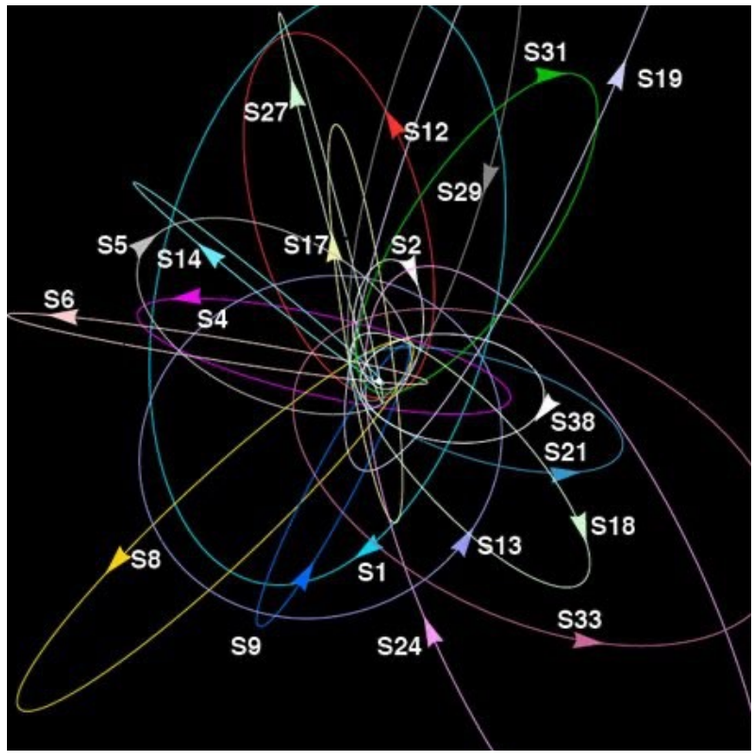


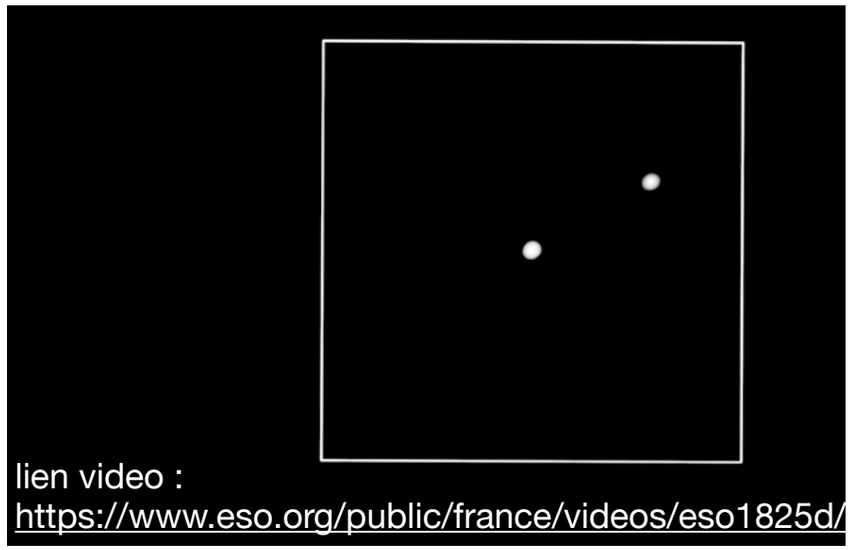
Observatoire de Paris/ASM Emmanuel Pécontal, lien video : https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_methodes-detection/html_images/envimage5.html

Mesurer la masse du trou noir central de notre Galaxie



lien video :
https://www.eso.org/public/videos/eso0226a/





lien video :
https://www.eso.org/public/france/videos/eso1825d/

Son nom : Sagittarius A*

Sa masse : $M_\bullet = 4.152 \times 10^6\ \mathrm{M}_\odot$
$(8.25 \times 10^{36}\ \mathrm{kg}\ !)$

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 : Ptolemée, 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

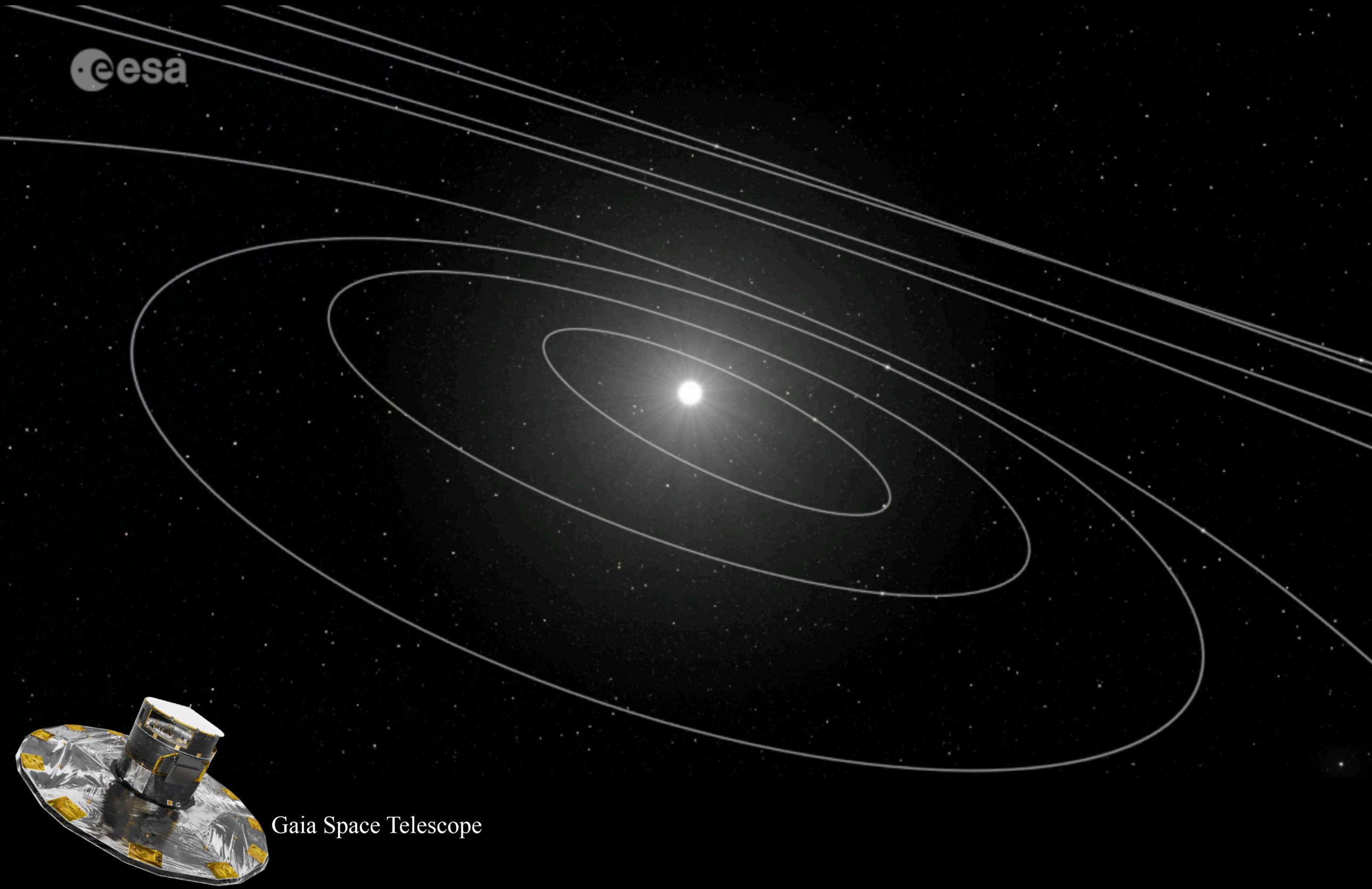
Cours 2 (17/01/23) : Le problème de la masse manquante : la matière noire
- Les galaxies à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les courbes de rotation des galaxies
- A la recherche de la masse manquante : gaz, trous noirs, neutrinos, etc.
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide
- Le Big Bang, la nucléosynthèse primordiale et le fonds diffus cosmologique
- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et des galaxies et les phénomènes de rétroaction

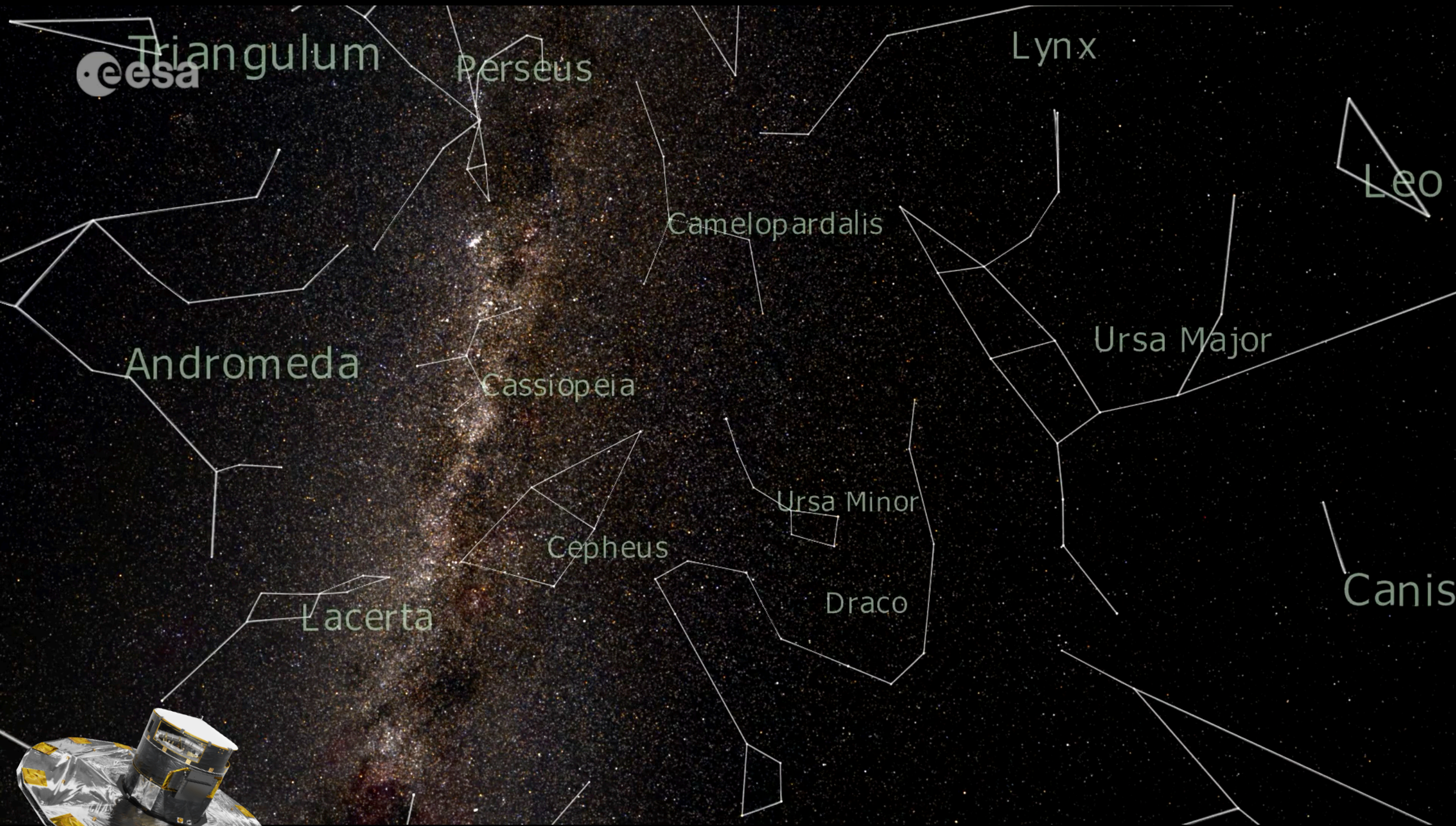
Cours 4 (31/01/23) : Les défis du modèle cosmologique actuel
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée

lien video : https://www.youtube.com/watch?v=17jymDn0W6U



lien video : https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_creates_richest_star_map_of_our_Galaxy_and_beyond

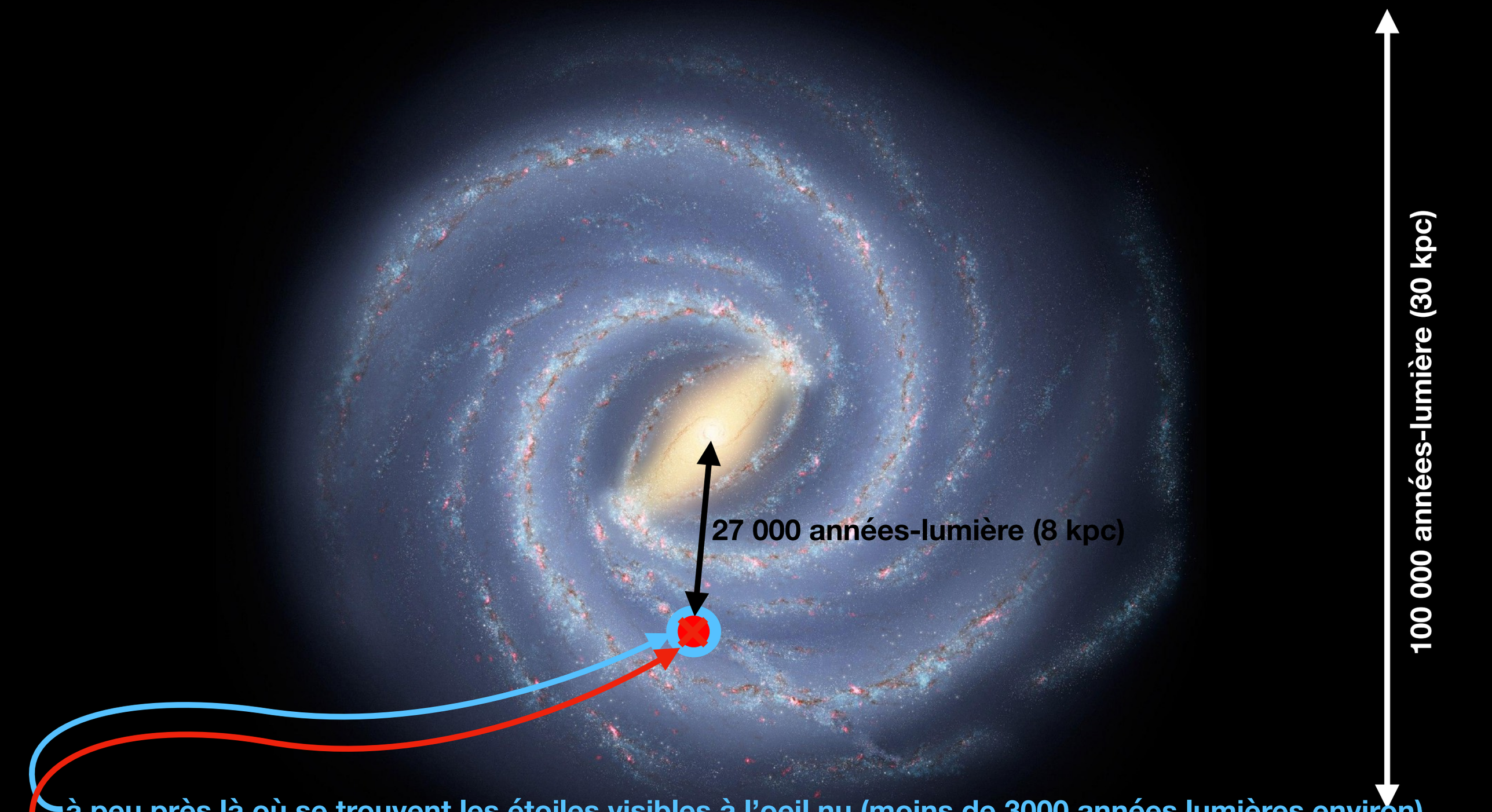


Gaia Space Telescope

lien video : https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Gaia_creates_richest_star_map_of_our_Galaxy_and_beyond

La Voie Lactée, notre Galaxie

(vue d'artiste)



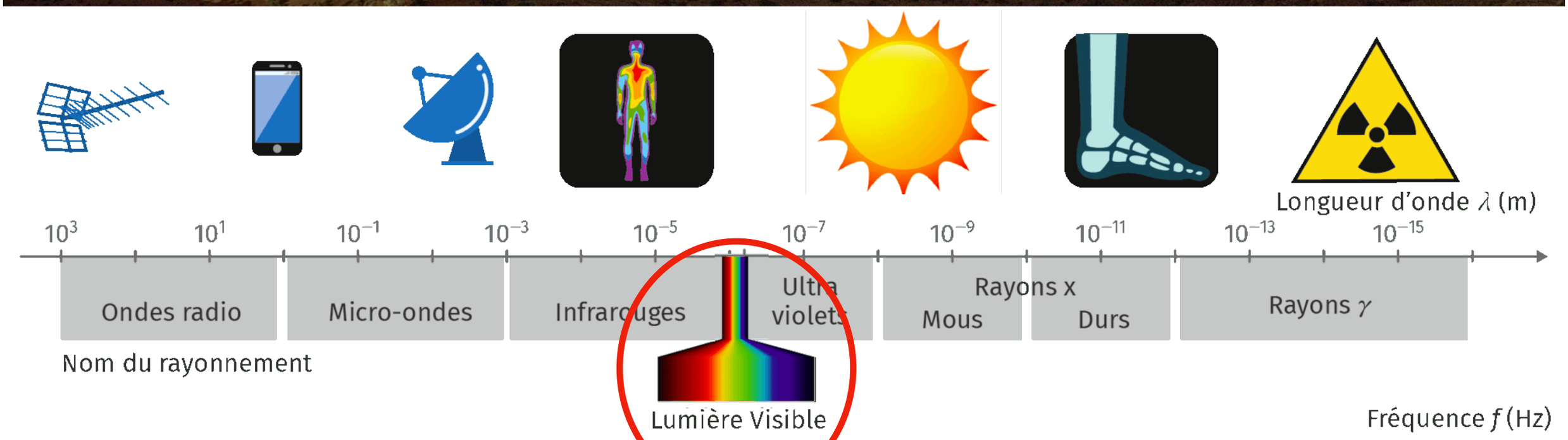
à peu près là où se trouvent les étoiles visibles à l'oeil nu (moins de 3000 années lumières environ)

seule la lumière de cette petite région nous est parvenue depuis l'Antiquité (2000 années-lumière)…
l'étoile la plus proche, Proxima Centauri, est à 4.3 années-lumière

(1 kiloparsec [kpc] = 3.09 10^{21} m)

NASA/JPL-Caltech

La Voie Lactée, notre Galaxie



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

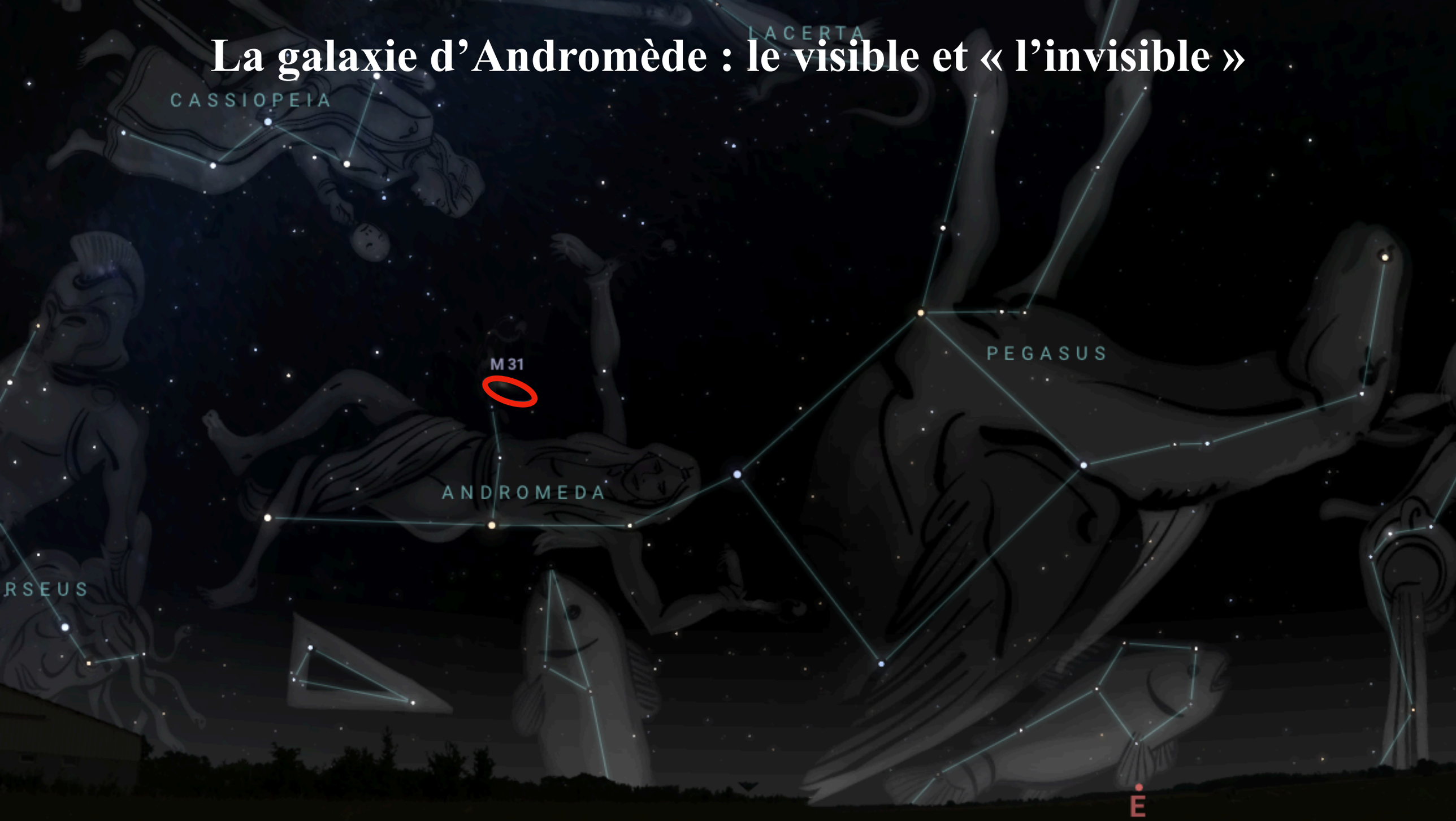
Ted Van

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

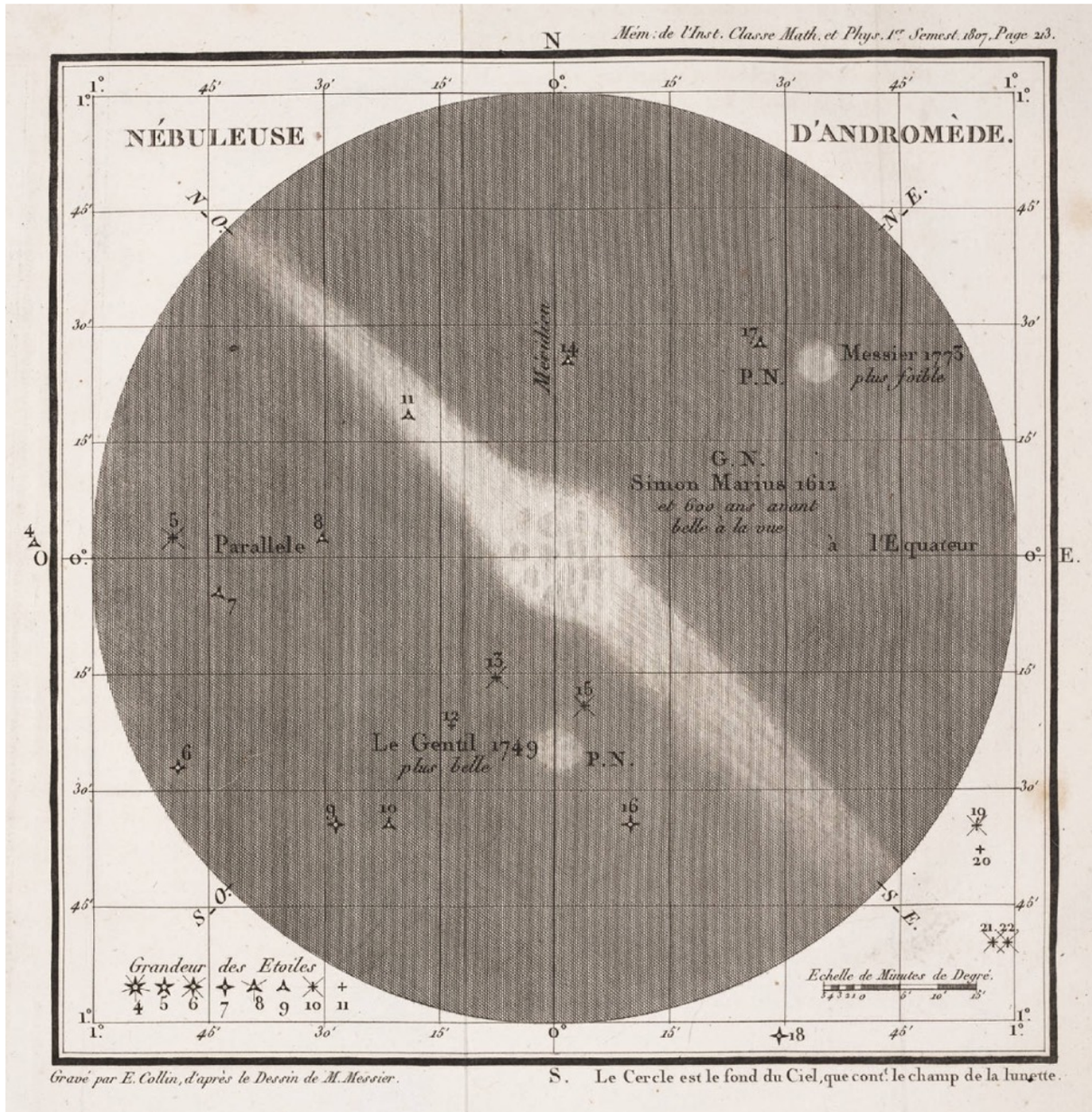
Abd al-Rahman al-Soufi, Livre des Étoiles Fixes, 1009-1000

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

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

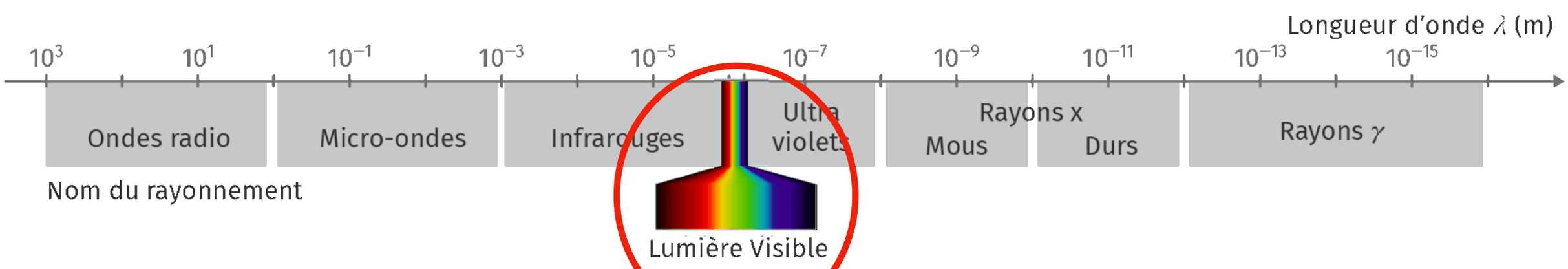


La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



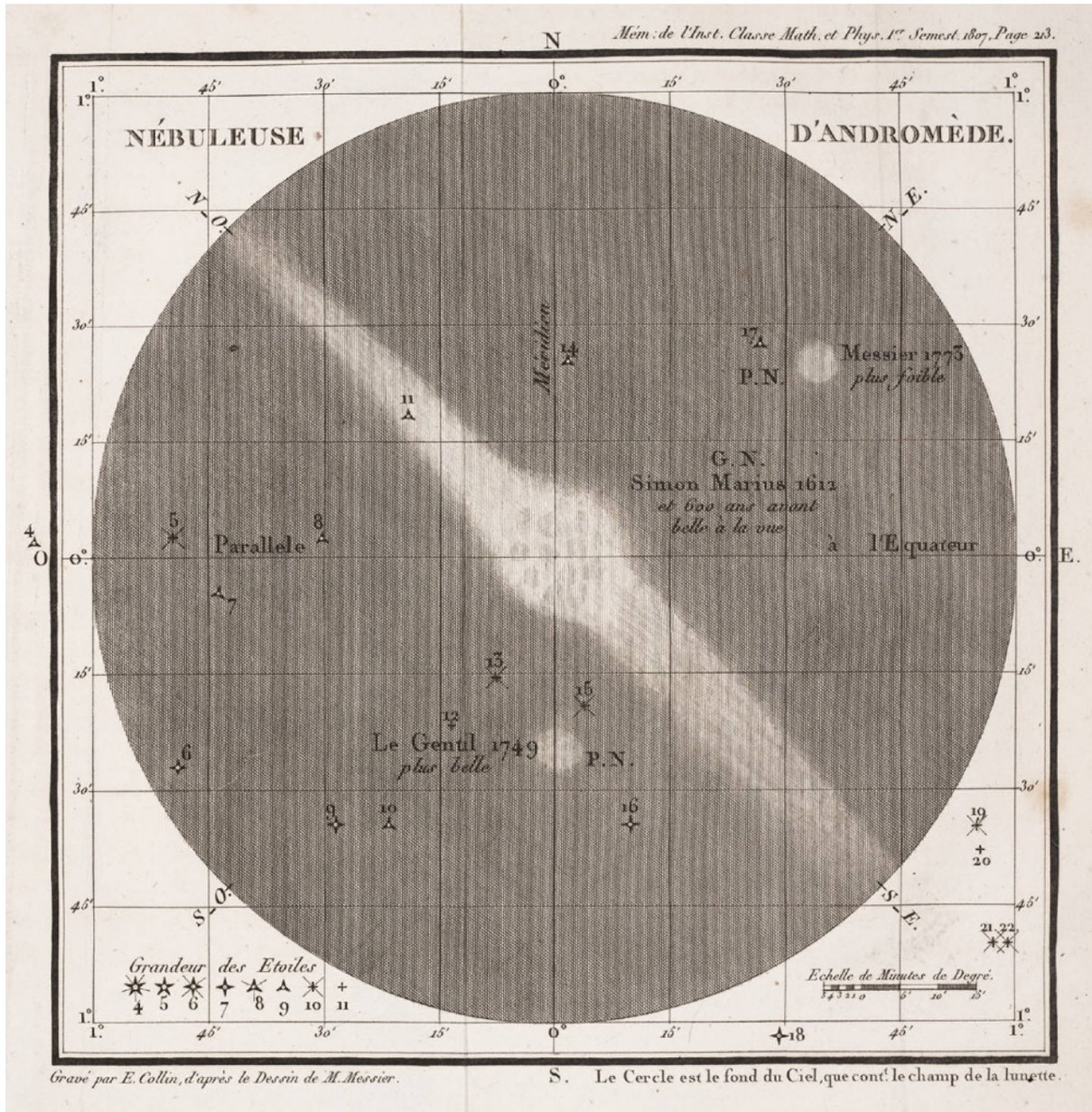
Charles Messier, 1807

Lunette astronomique (réfracteur)



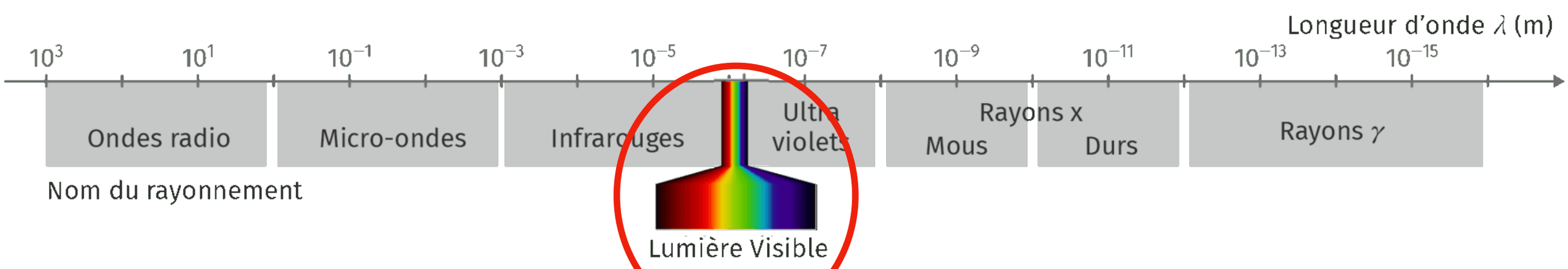
Hotel de Cluny, Paris

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



Charles Messier, 1807

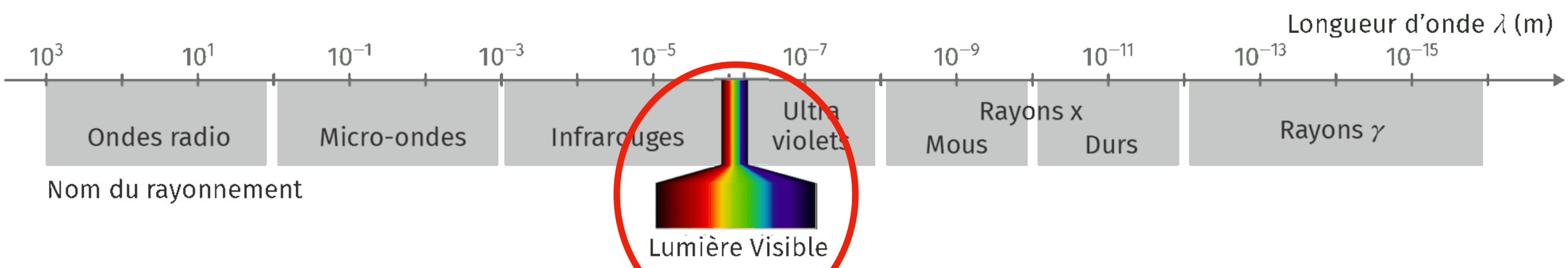
Lunette astronomique (réfracteur)



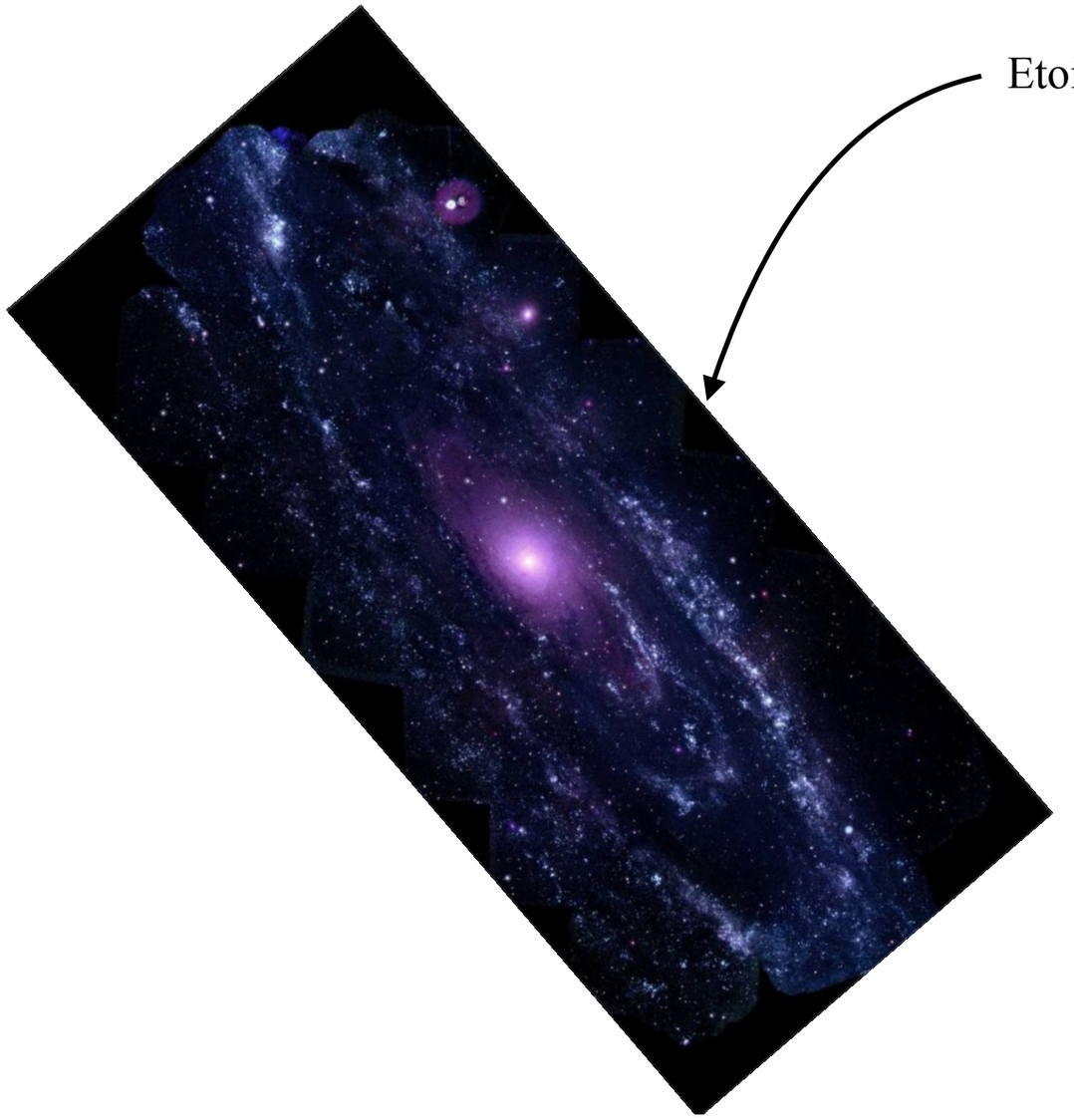
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »

Etoiles, amas d'étoiles, absorption due aux poussières

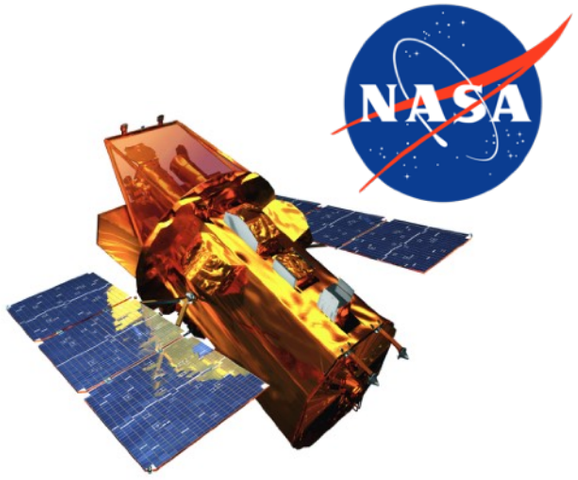
Telescope (réflecteur)



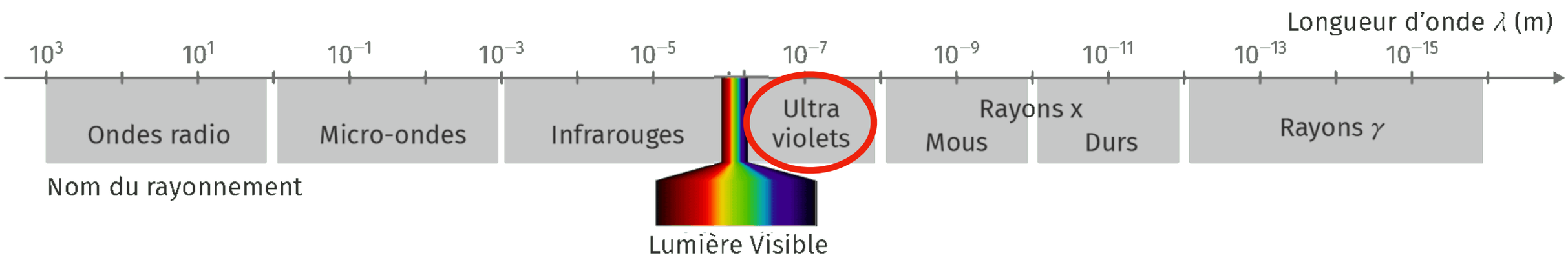
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



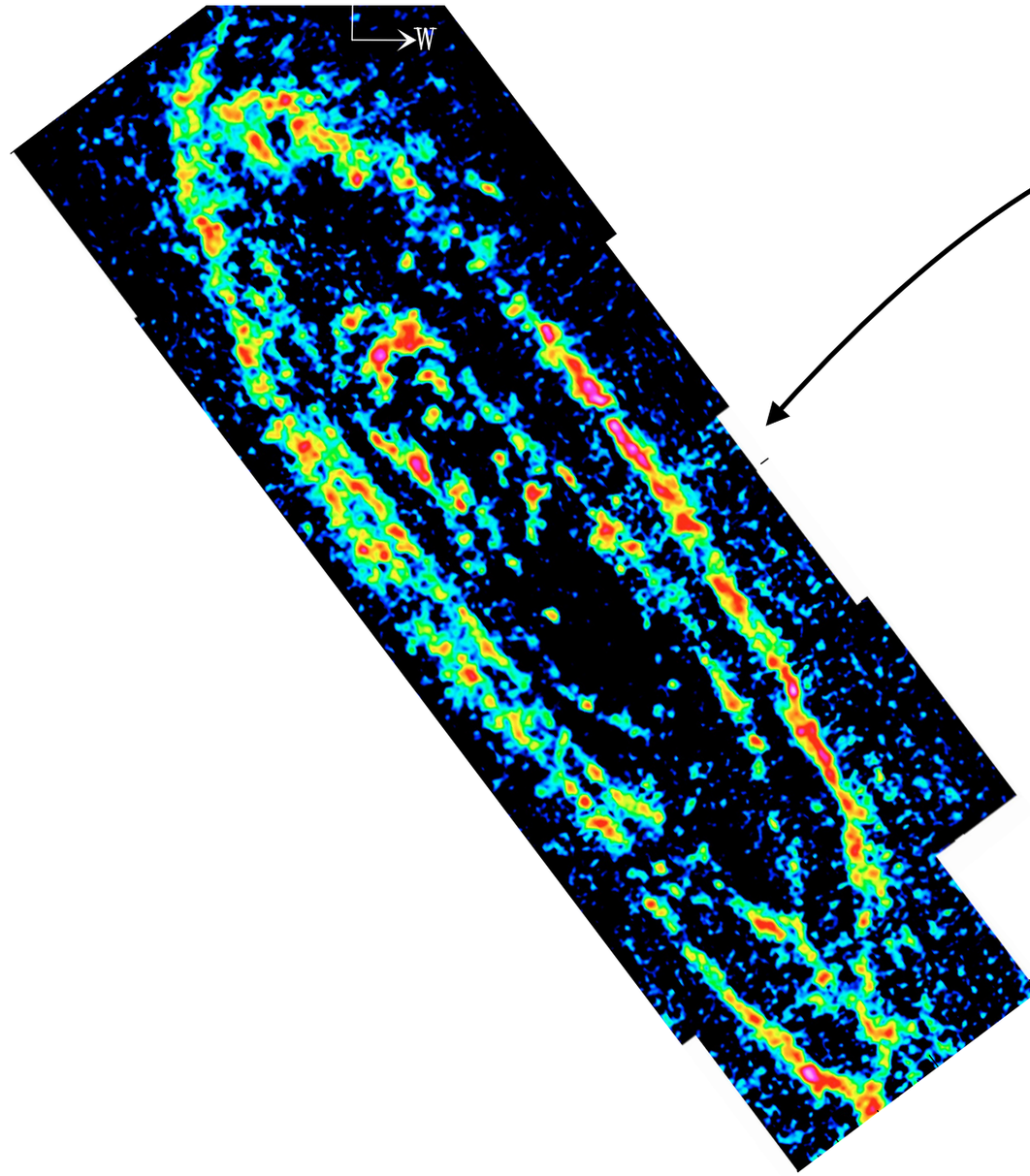
Etoiles jeunes et chaudes, amas d'étoiles



Swift space Observatory

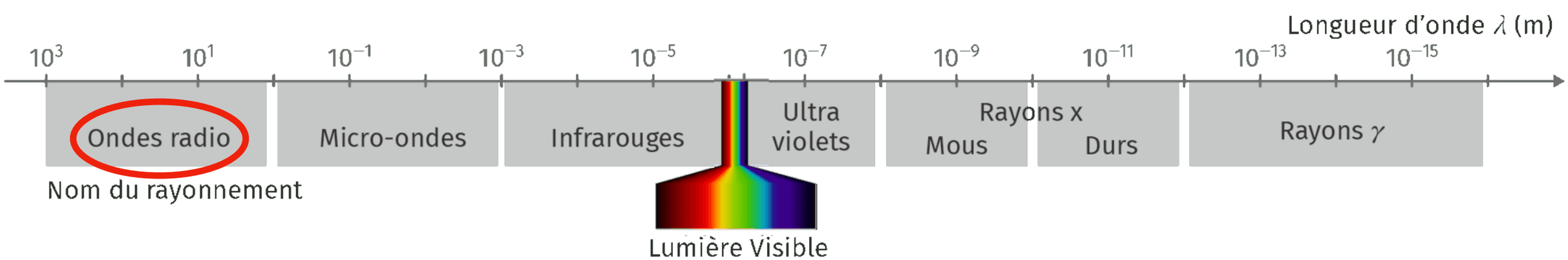


La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »

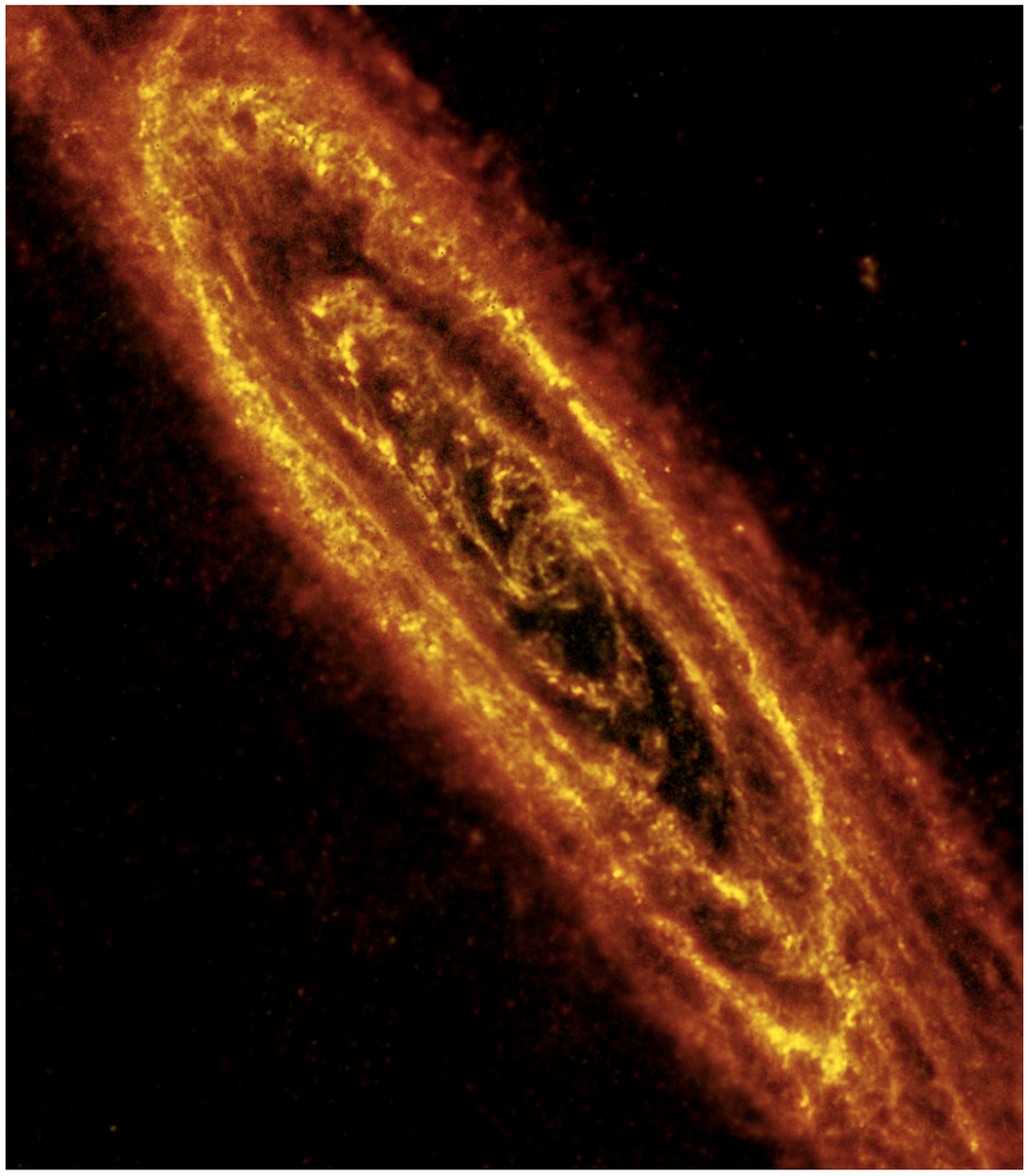


Gaz moléculaire froid (CO)

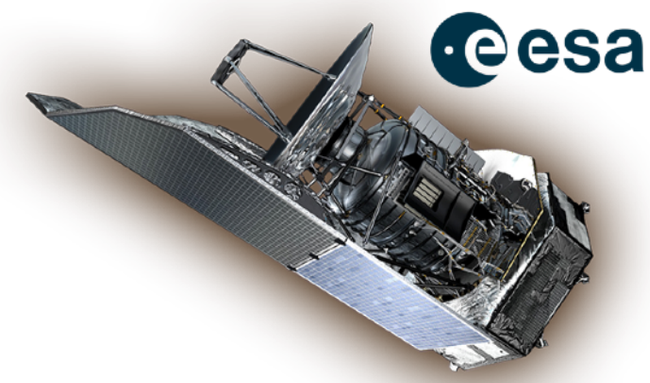
Radiotélescope de 30m



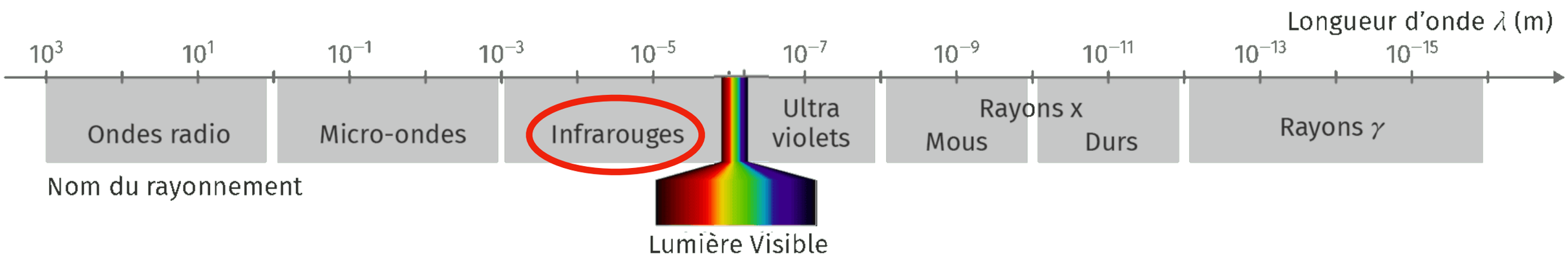
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



Poussières chauffées par les étoiles

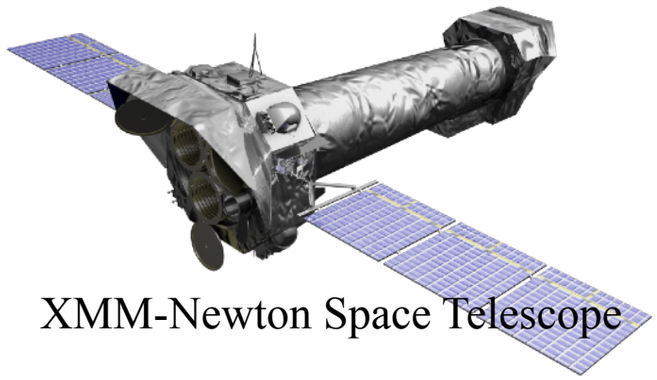


Herschel Space Telescope

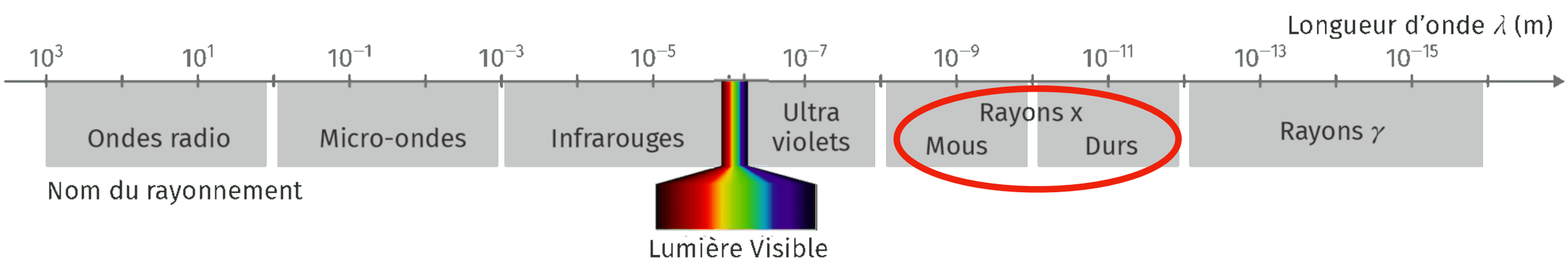


La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »

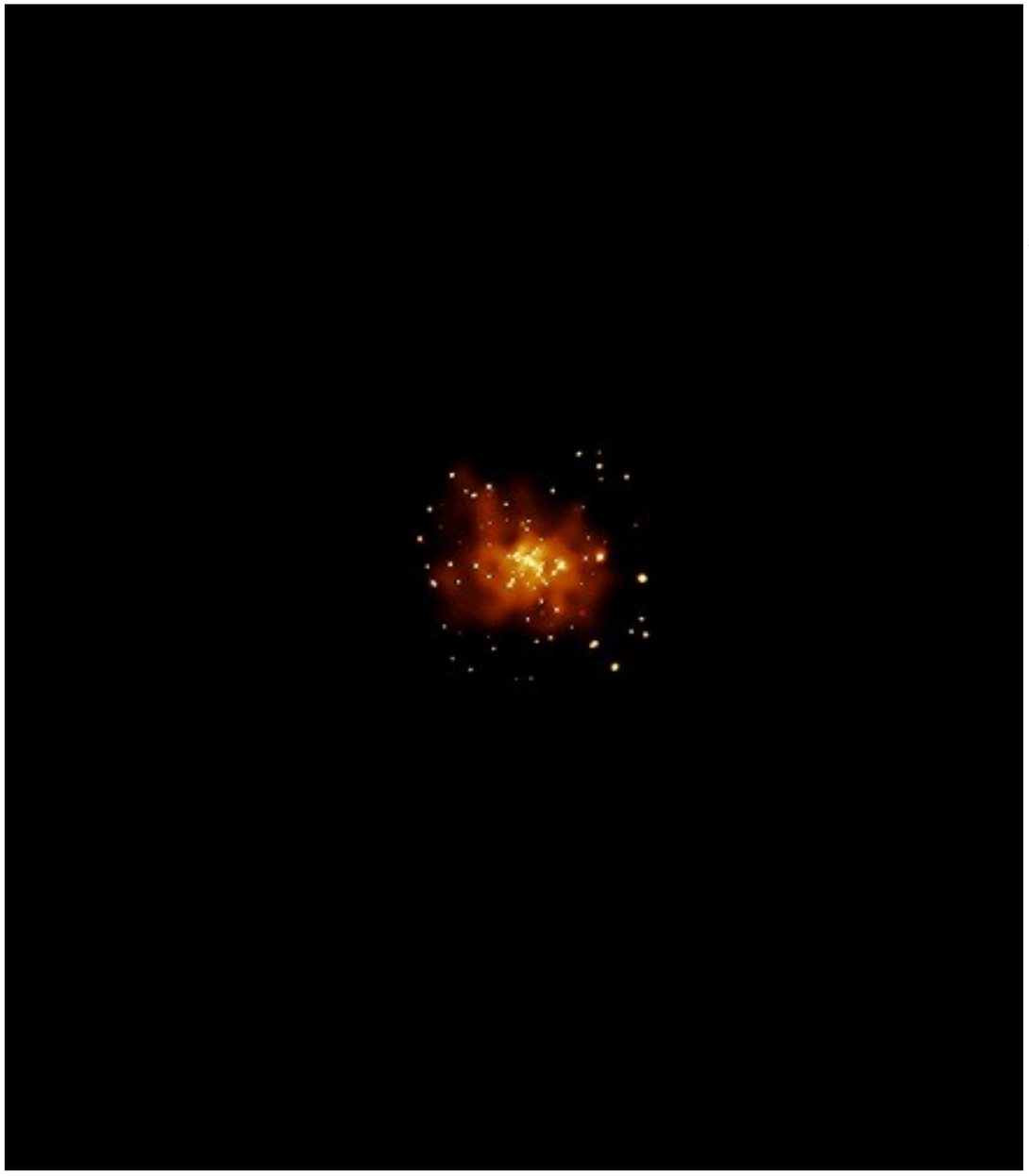
Etoiles massives en fin de vie (étoiles binaires, débris d'explosions de supernovae)



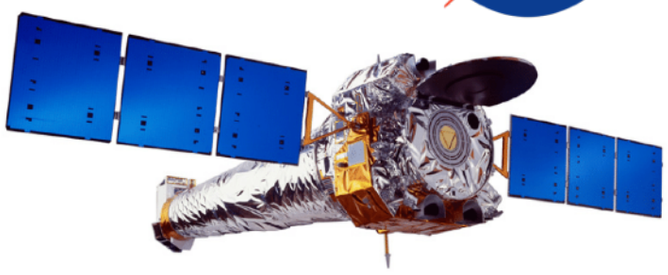
XMM-Newton Space Telescope



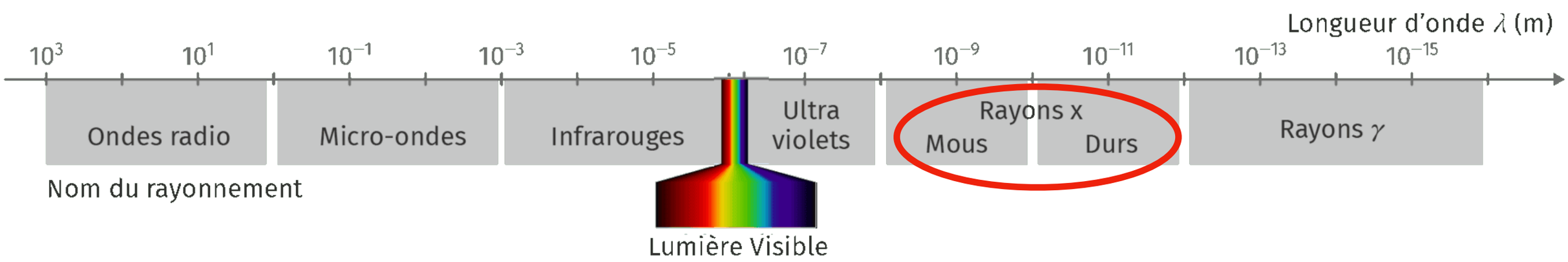
La galaxie d'Andromède : le visible et « l'invisible »



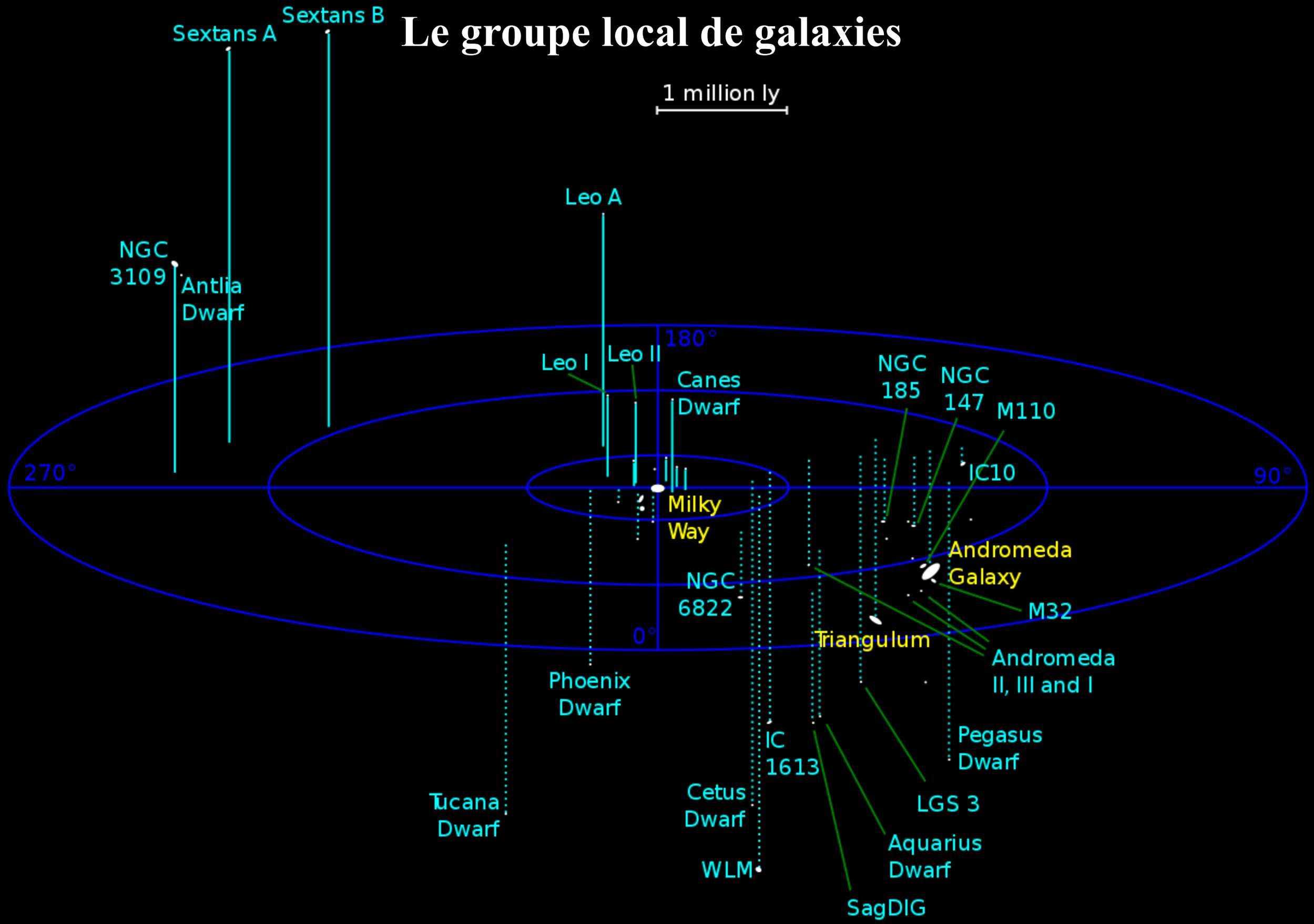
Etoiles massives en fin de vie (étoiles binaires, débris d'explosions de supernovae)



Chandra X-ray observatory



Le groupe local de galaxies



Richard Powell

Le groupe local de galaxies

M31 (Galaxie d'Andromède, galaxie spirale)

Le groupe local de galaxies

M33 (Galaxie du Triangle, galaxie spirale)

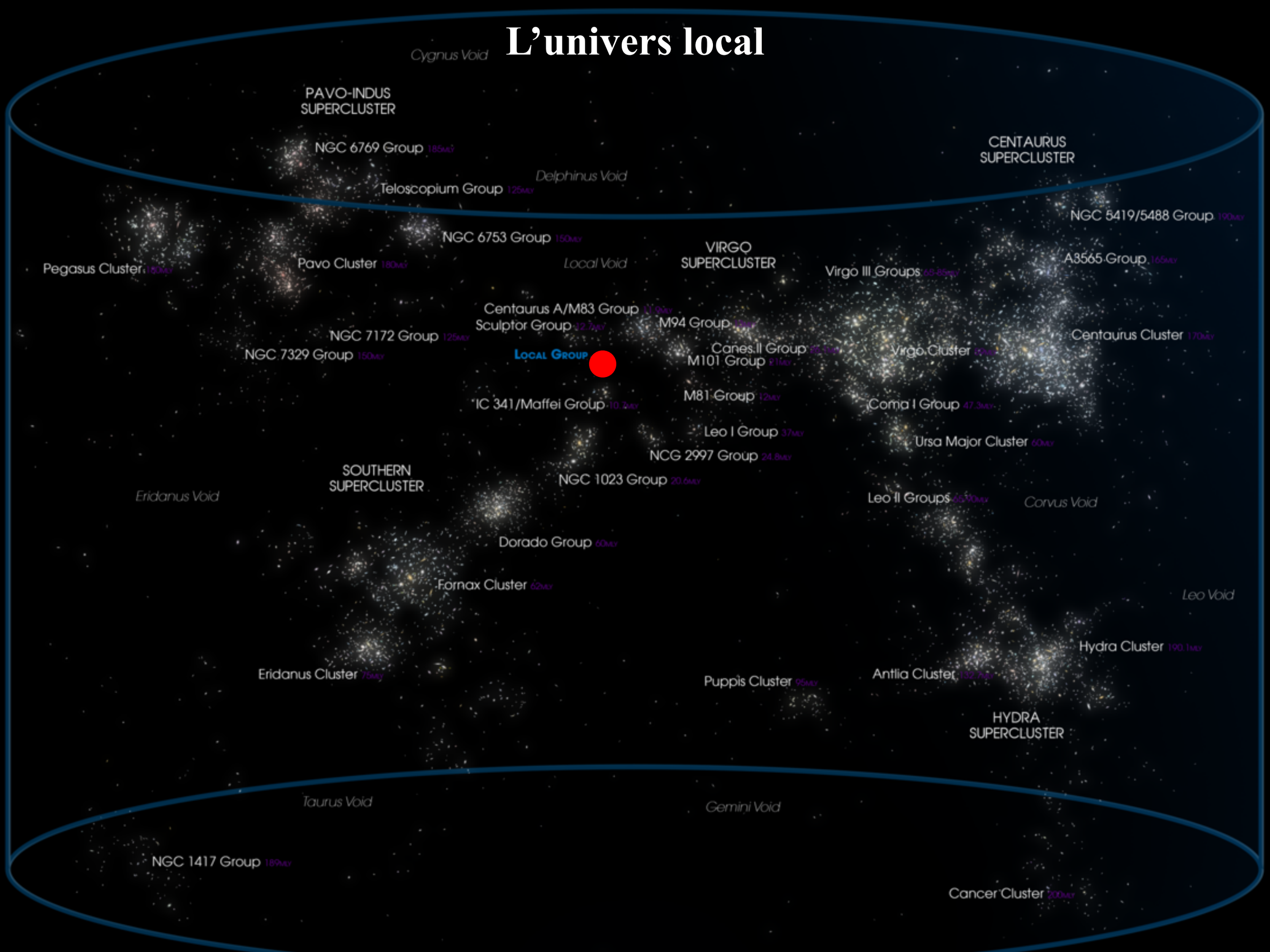
Le groupe local de galaxies

Grand Nuage de Magellan (galaxie irrégulière)

Le groupe local de galaxies

NGC 6822 (galaxie irrégulière)

L'univers local

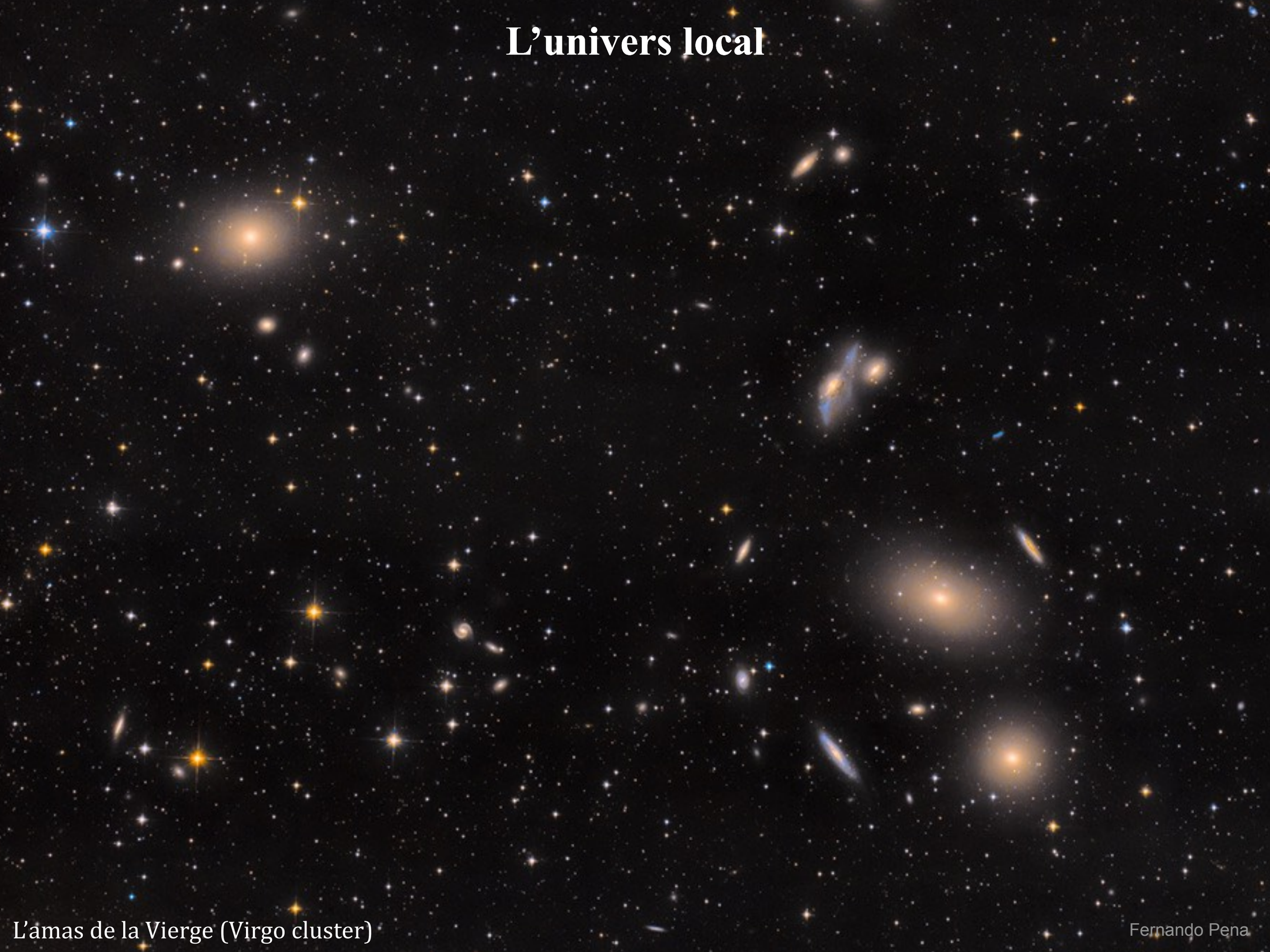


L’univers local

L’amas de la chevelure de Bérénice (Coma cluster)

Van Dokkum et al.

L’univers local



L’amas de la Vierge (Virgo cluster)

Des milliers et des milliers d’autres galaxies

Hubble Space Telescope

lien video : https://esahubble.org/videos/heic0714g/

La diversité des galaxies

Hubble Space Telescope

M51 (galaxie spirale)

La diversité des galaxies

Hubble Space Telescope

M81 (galaxie spirale)

La diversité des galaxies

M87 (galaxie elliptique géante)

Chris Mihos (Case Western Reserve University)/ESO

La diversité des galaxies

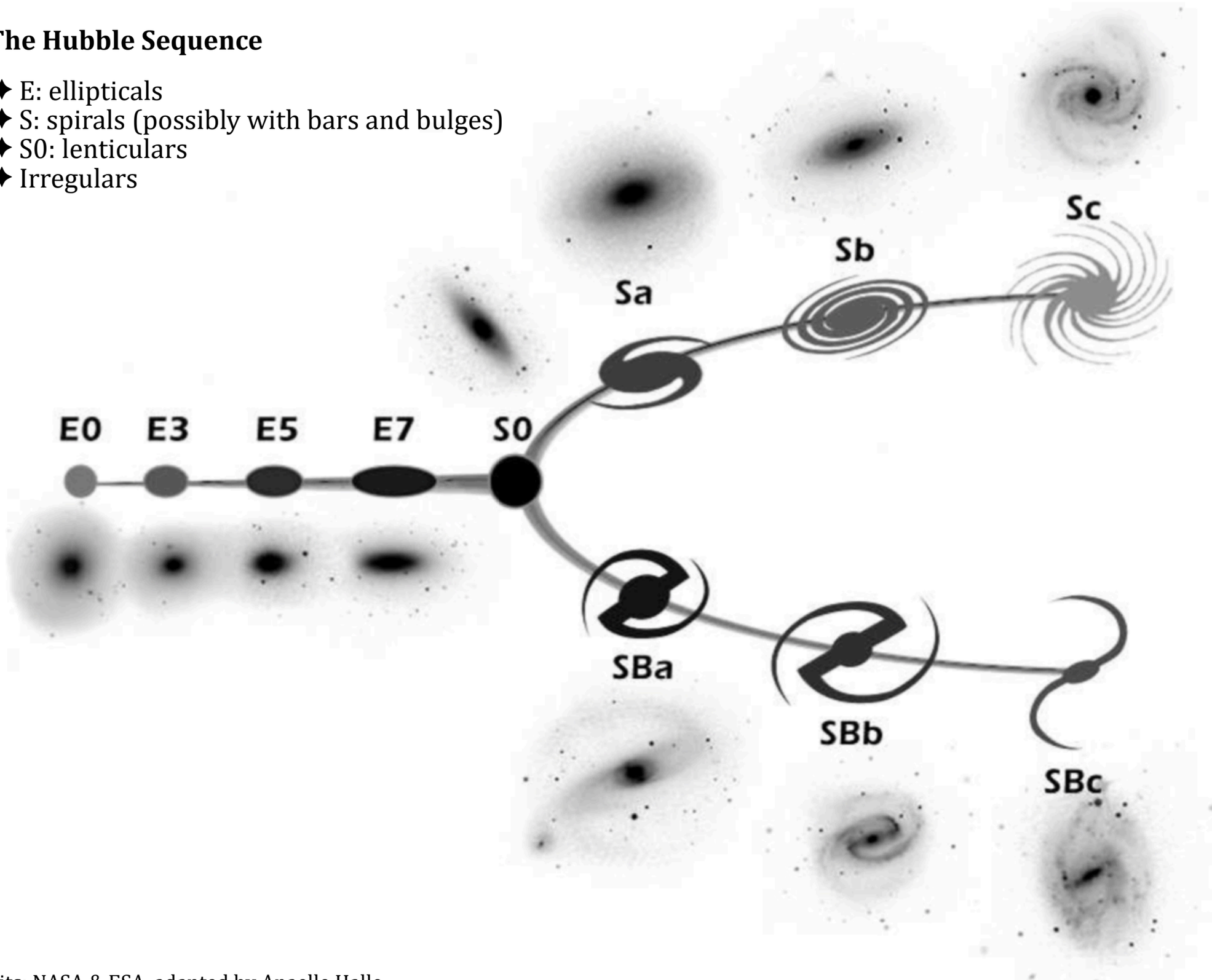
Hubble Space Telescope

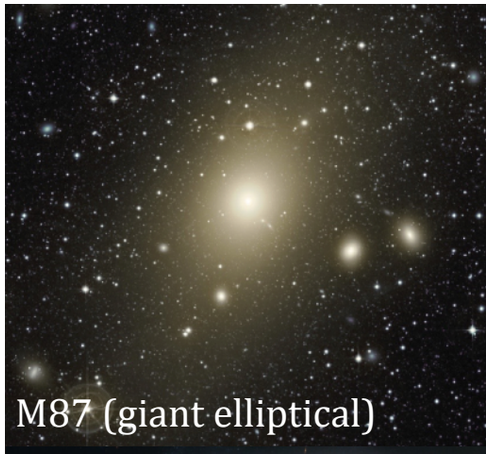
NGC 6861 (galaxie lenticulaire)

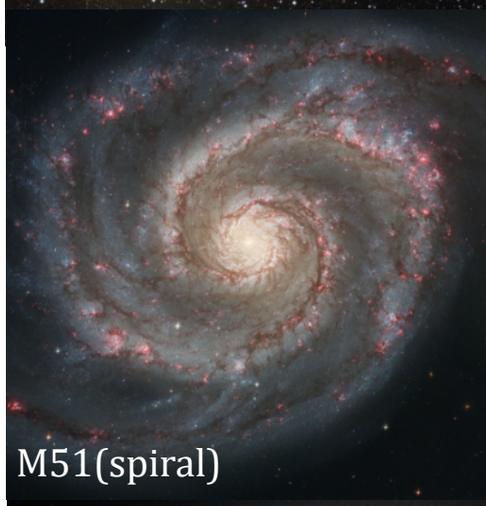
La diversité des galaxies

The Hubble Sequence

- ✦ E: ellipticals
- ✦ S: spirals (possibly with bars and bulges)
- ✦ S0: lenticulars
- ✦ Irregulars




M87 (giant elliptical)


M51(spiral)

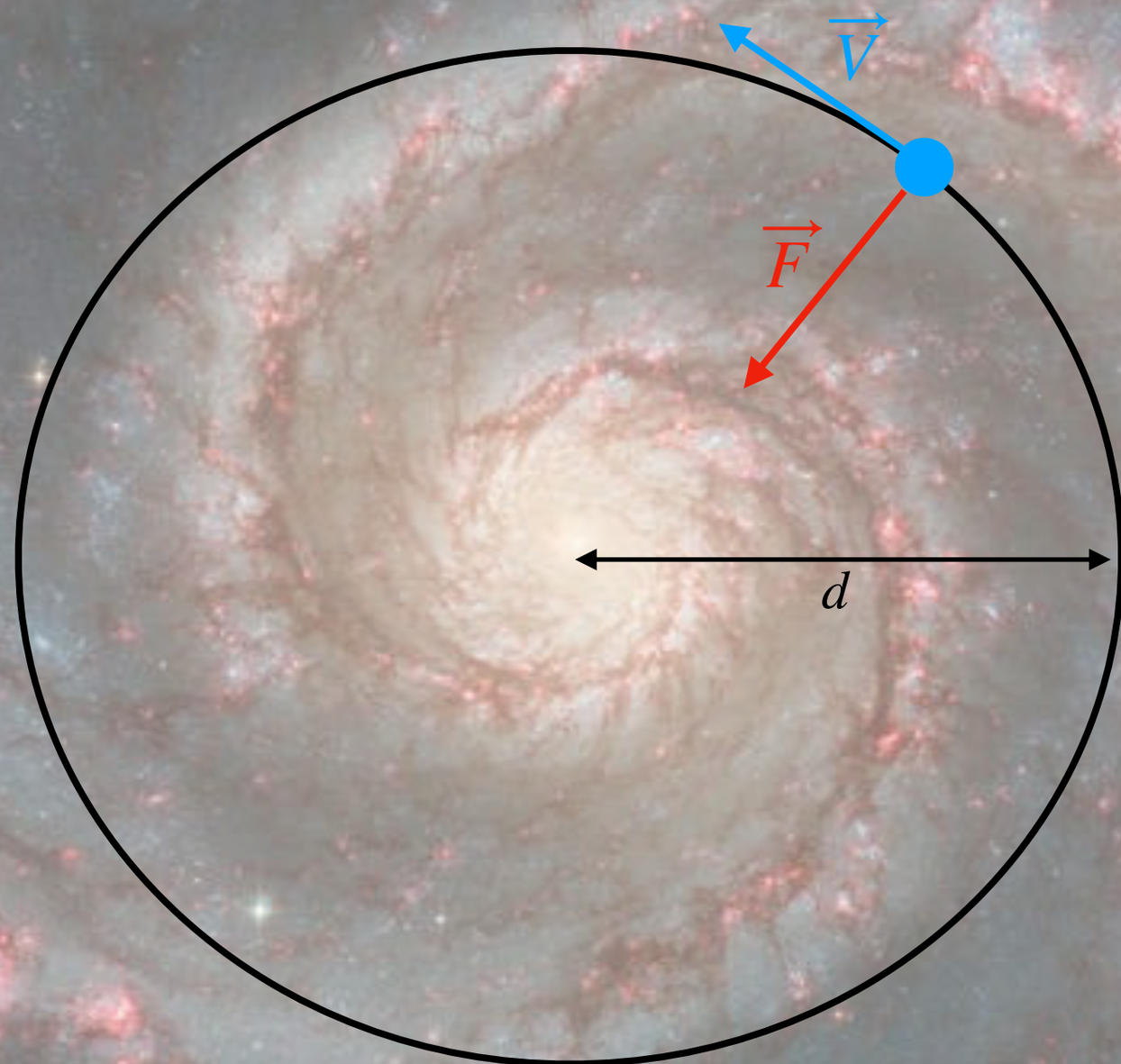
NGC 6861 (lenticular)

LMC (irregular)

Credits: NASA & ESA, adapted by Anaelle Halle

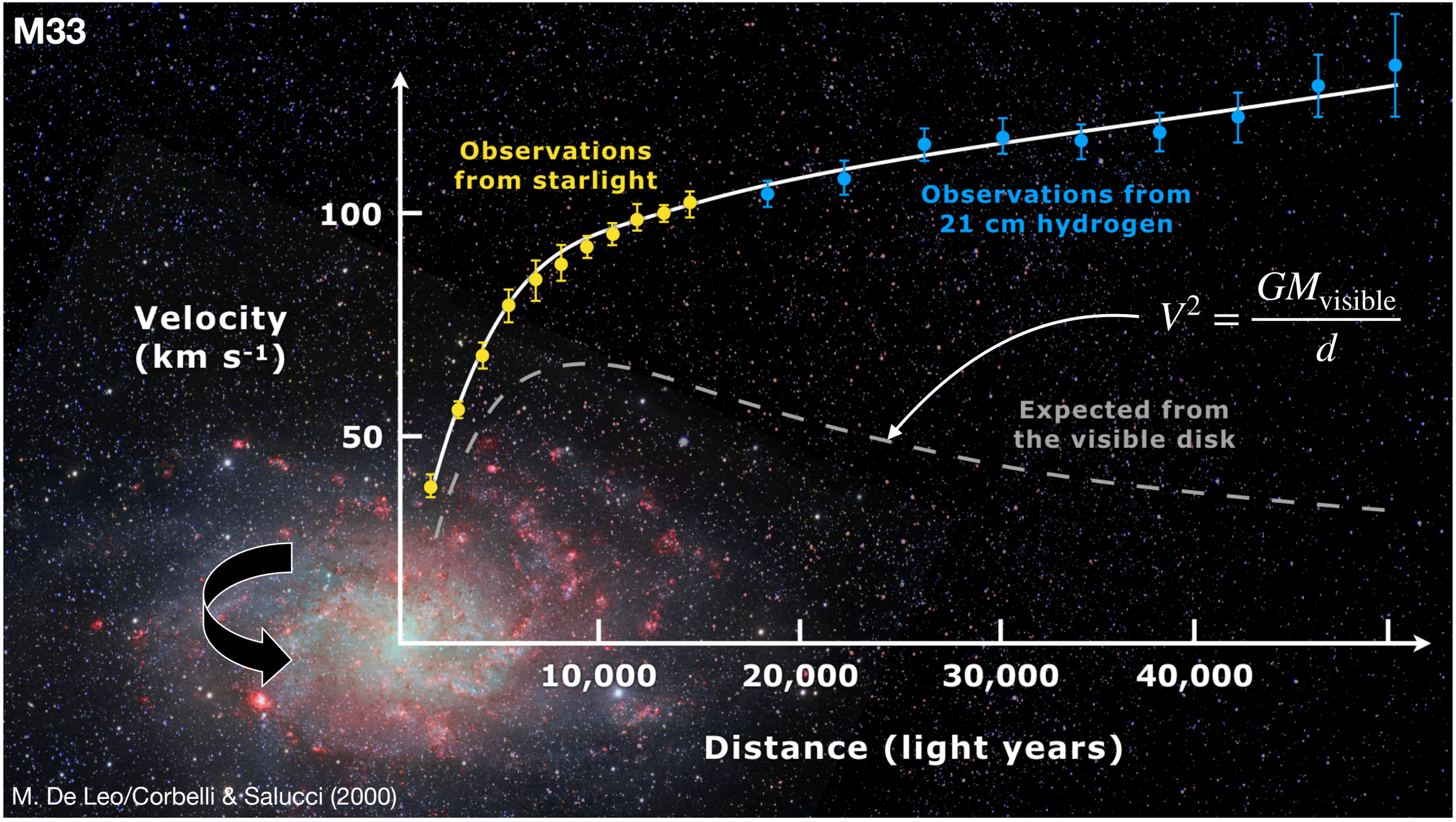
Un halo de matière noire ?

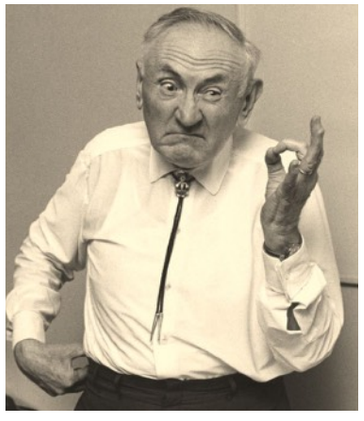
Courbe de rotation des galaxies



$$V^2 = \frac{GM}{d}$$

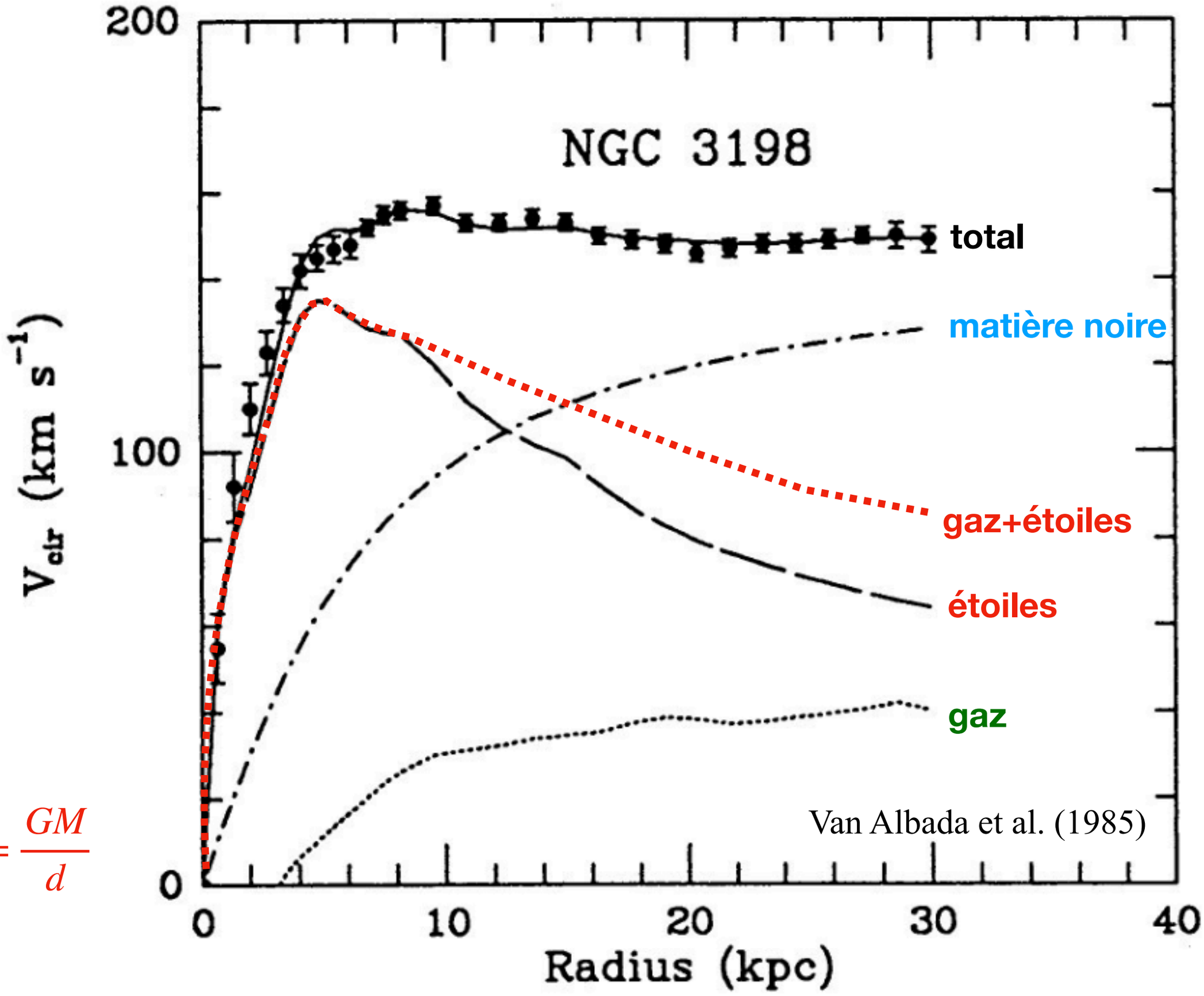
Courbe de rotation des galaxies





Fritz Zwicky, Vera Rubin & Albert Bosma

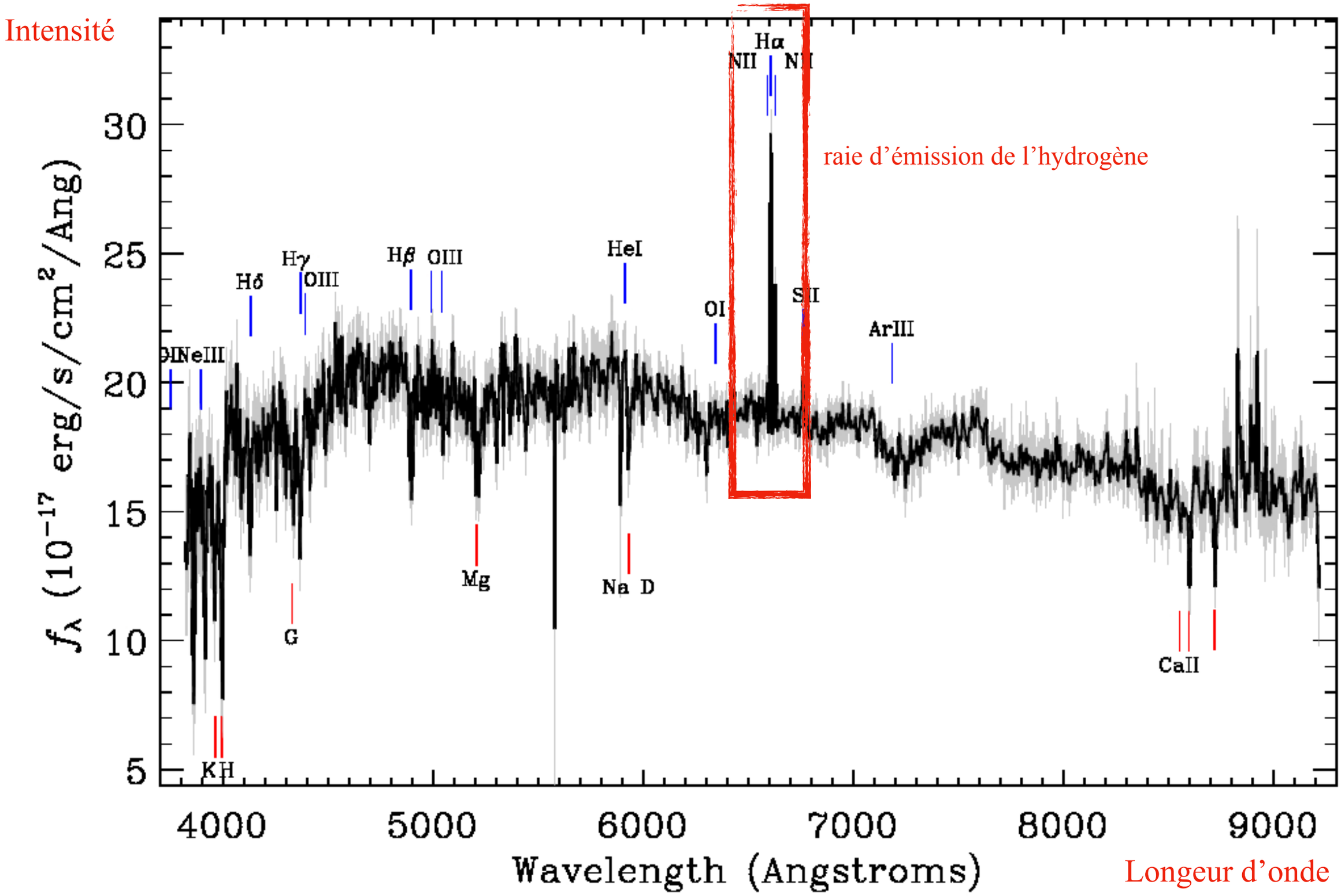
Courbe de rotation des galaxies



$$V^2 = \frac{GM}{d}$$

Comment mesurer la vitesse d'une galaxie ?

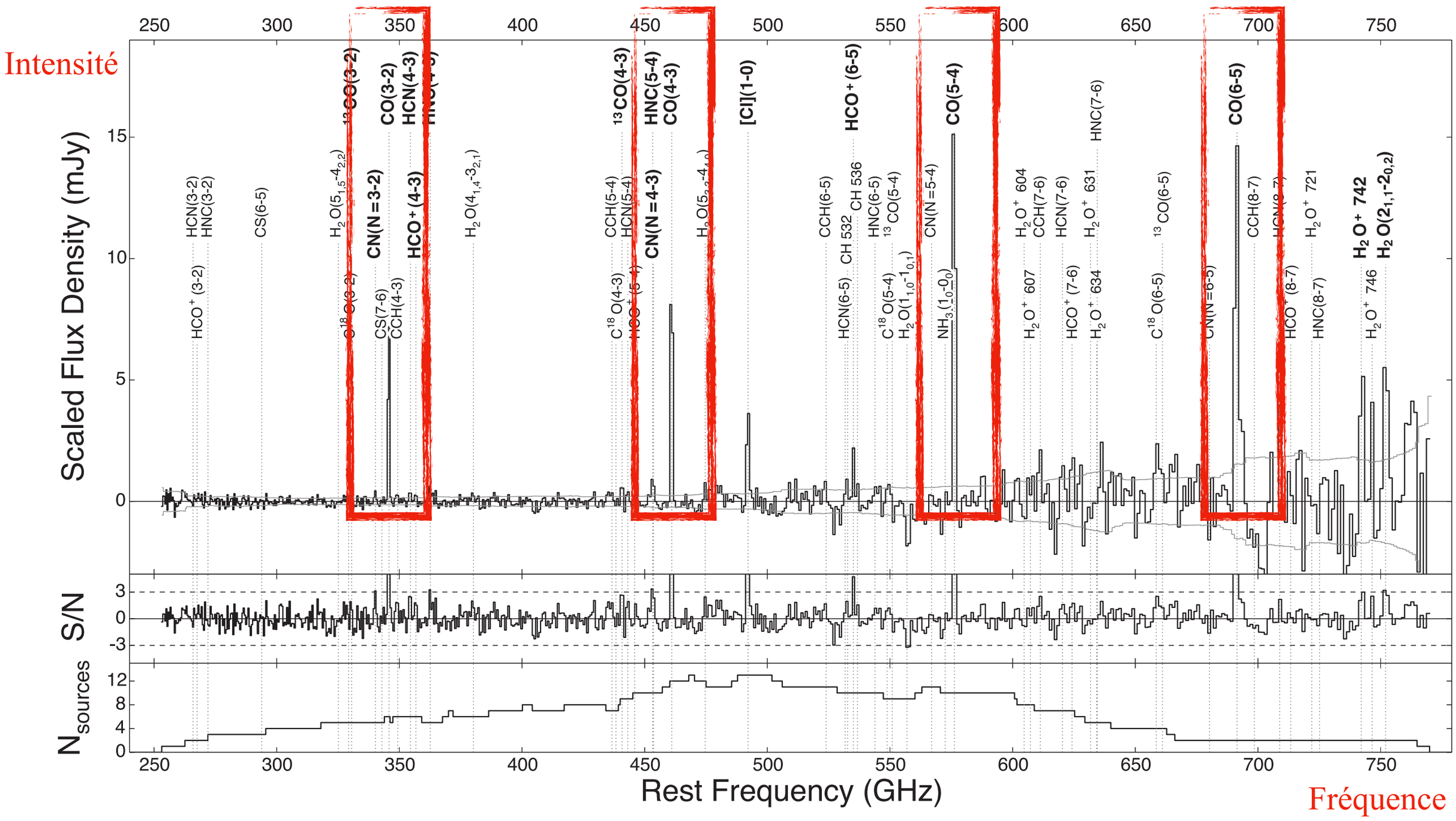
Spectre d'une galaxie spirale



Comment mesurer la vitesse d'une galaxie ?

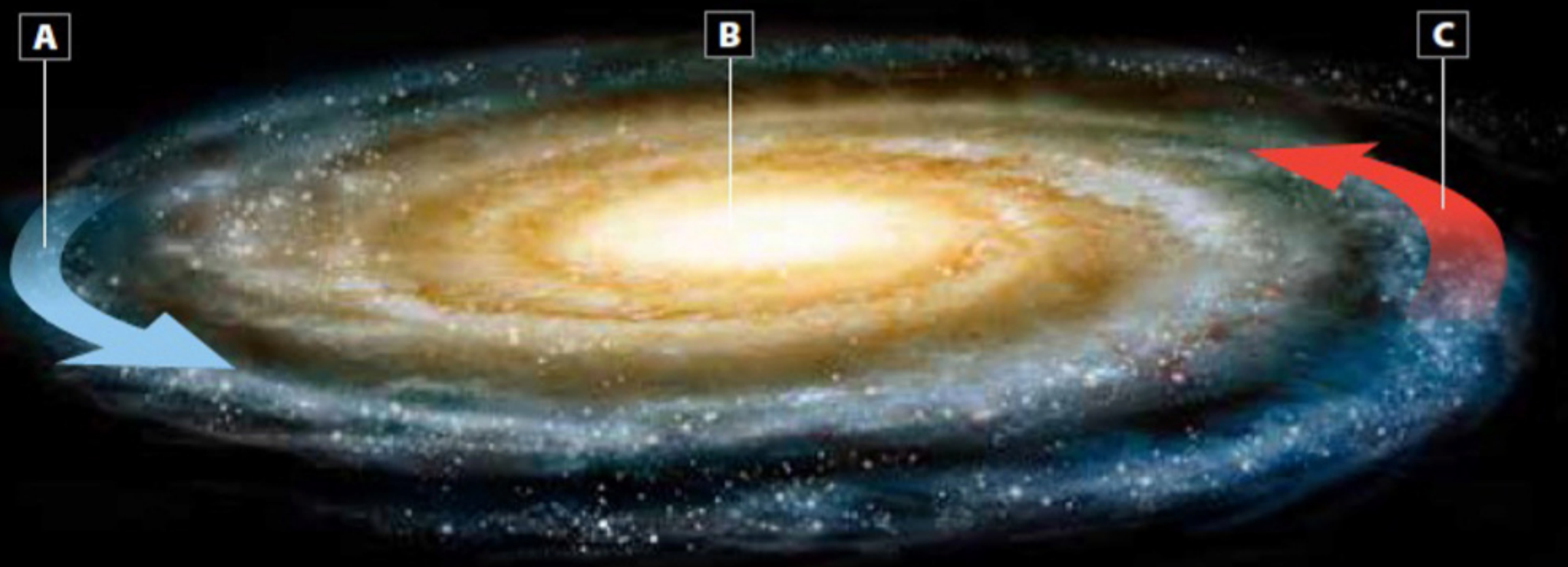
Spectre composite de galaxie spirale

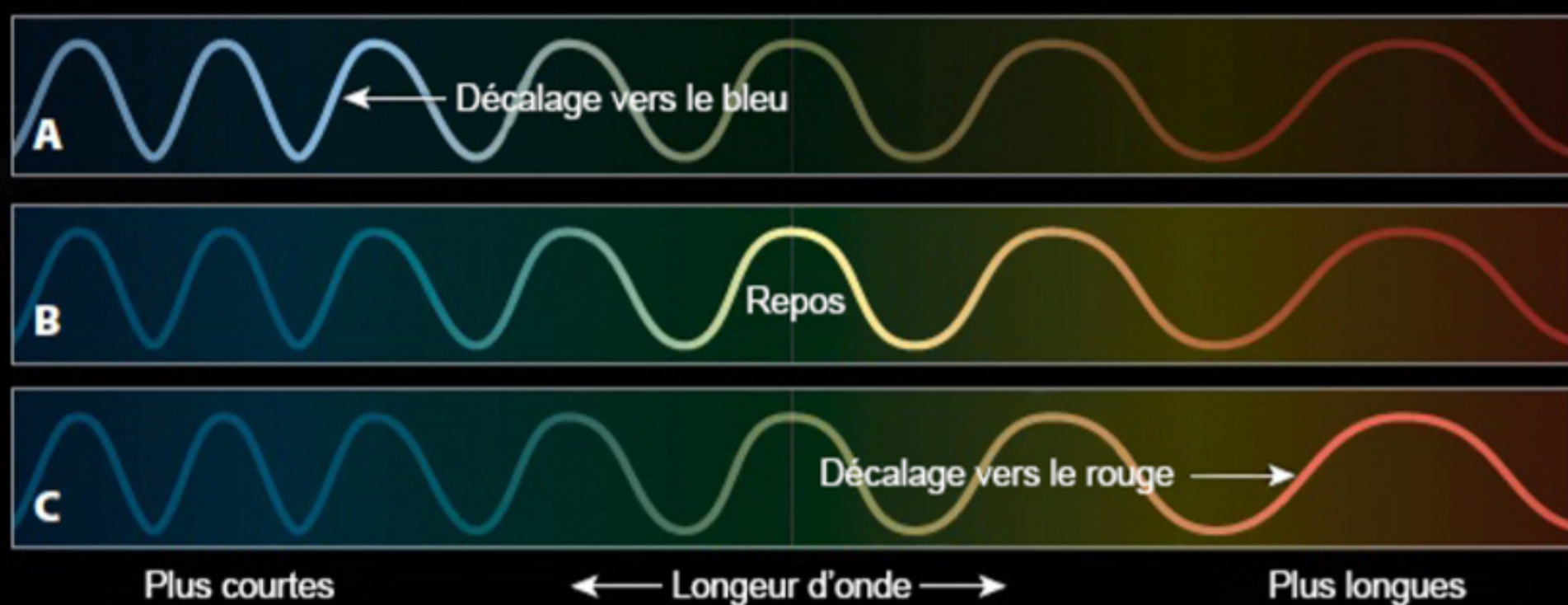
raies d'émission du monoxyde de carbone CO (gaz moléculaire)



Spilker et al. (2014)

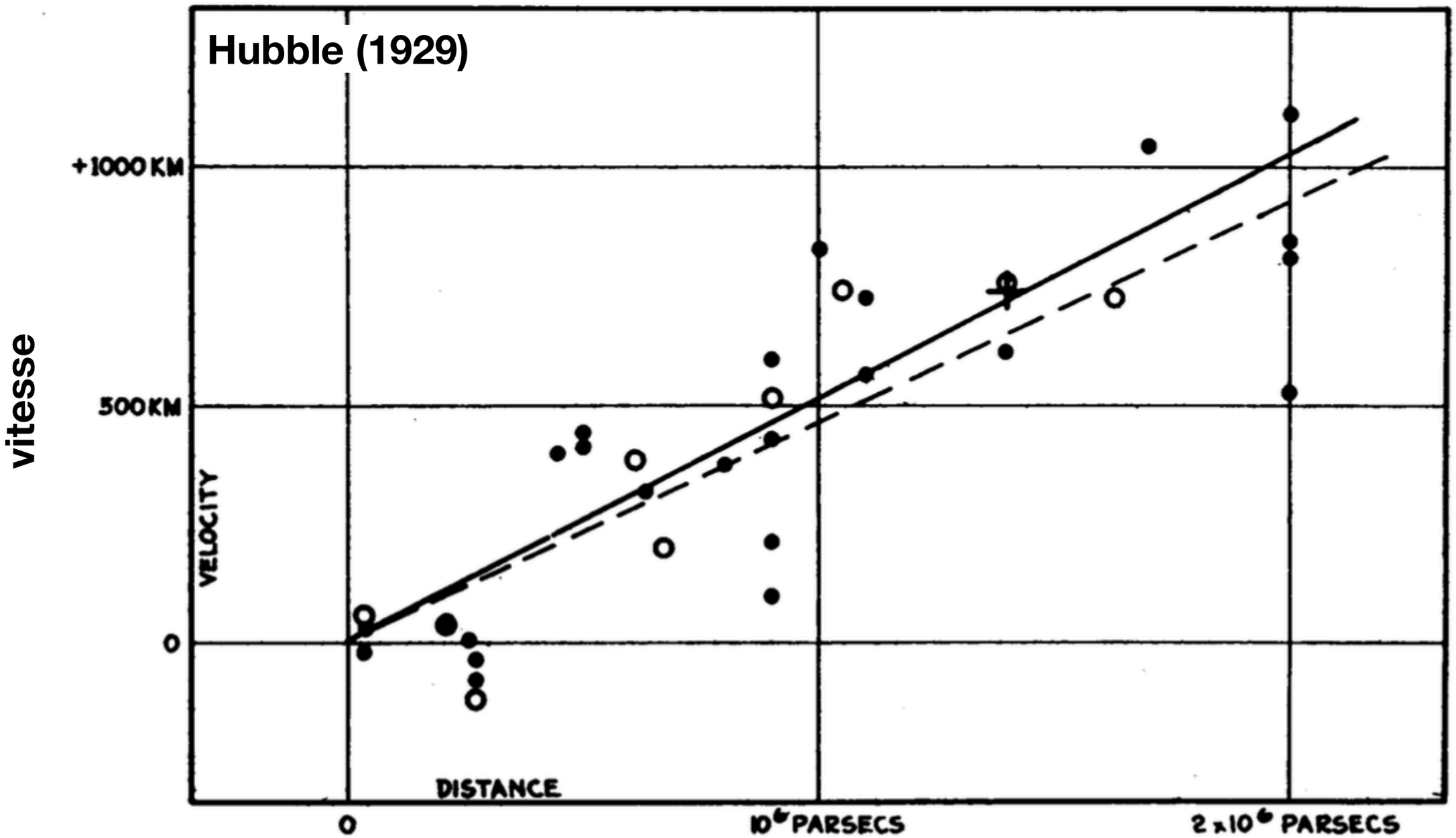
Comment mesurer la vitesse d'une galaxie ?





Source: Astronomy/Roen Kelly, adaptation T.Lombry

Un univers en expansion



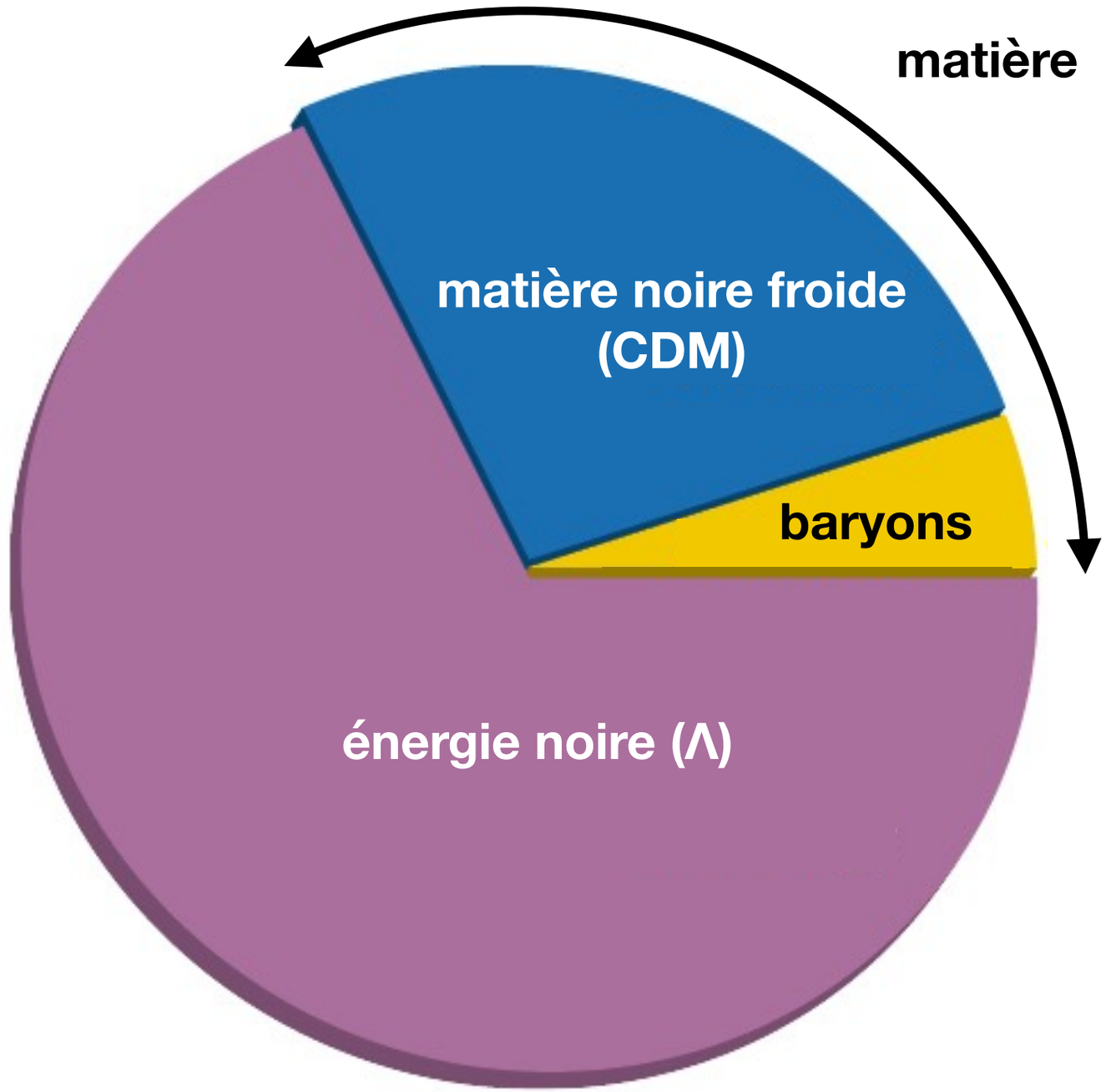
vitesse

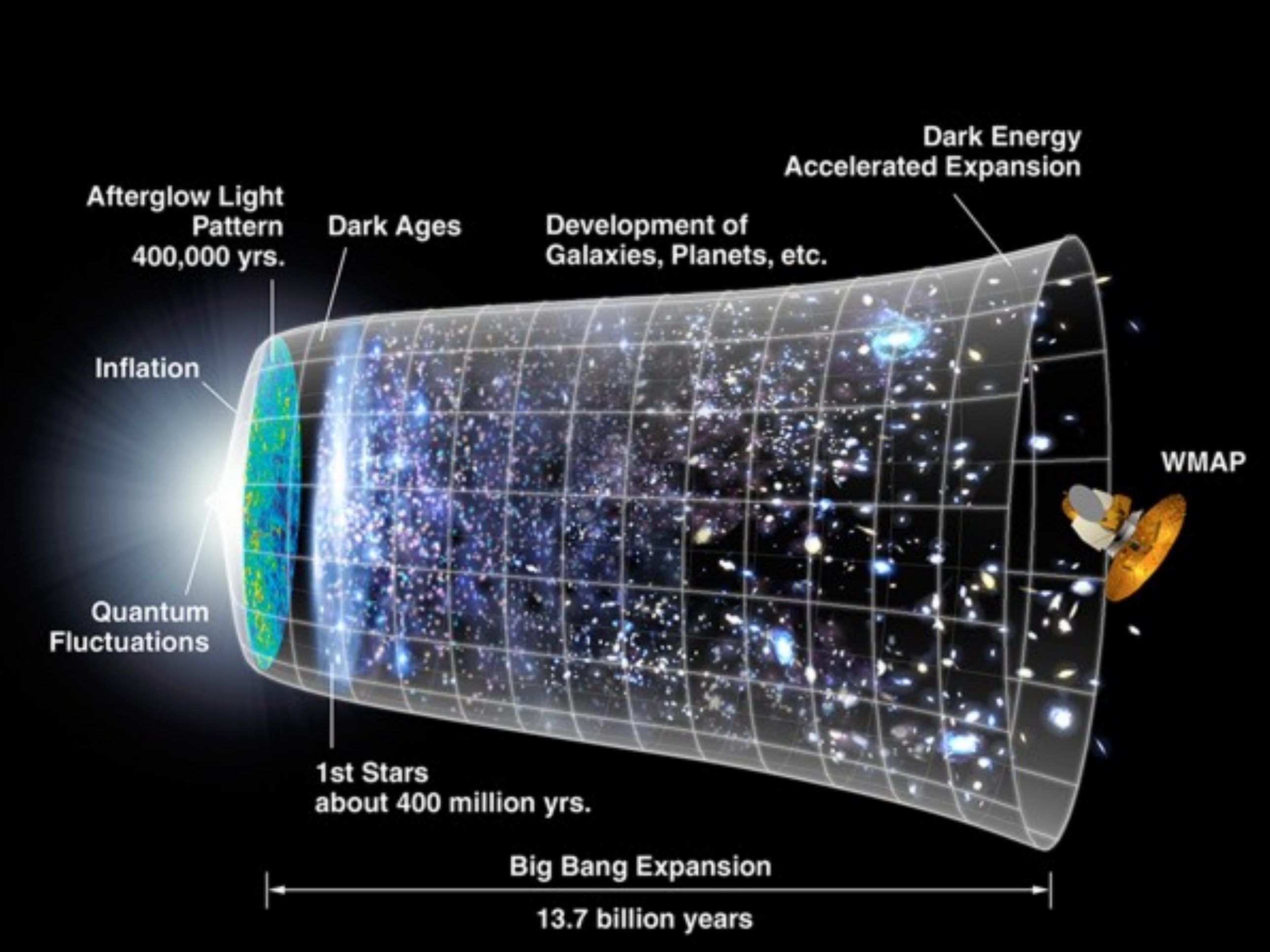
distance

… et même en expansion accélérée !

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

La composition de l'Univers dans le modèle ΛCDM




Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
WMAP
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years

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 : Ptolemée, 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
- Les galaxies à différentes longueurs d'onde : le visible et l'invisible
- Les courbes de rotation des galaxies
- A la recherche de la masse manquante : gaz, trous noirs, neutrinos, etc.
- Le modèle cosmologique actuel

Cours 3 (24/01/23) : L'histoire de l'Univers avec matière noire froide
- Le Big Bang, la nucléosynthèse primordiale et le fonds diffus cosmologique
- Le scénario hiérarchique de formation des galaxies
- La toile cosmique et les halos de matière noire
- La formation des étoiles et des galaxies et les phénomènes de rétroaction

Cours 4 (31/01/23) : Les défis du modèle cosmologique actuel
- La non-détection des particules de matière noire
- Les problèmes à l'échelle des galaxies
- Résoudre une partie des problèmes grâce aux phénomènes de rétroaction
- L'énergie noire et la constante de Hubble

Cours 5 (07/02/23) : Les alternatives à la matière noire froide
- Les autres types de matière noire : chaude, tiède, floue, interagissant avec elle-même
- La gravité modifiée