

Cours de cosmologie

4PYOC

Collège Rousseau et CEC A.-Chavanne

Genève

A. Gasparini



SwissMAP

The Mathematics of Physics
National Centre of Competence in Research



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

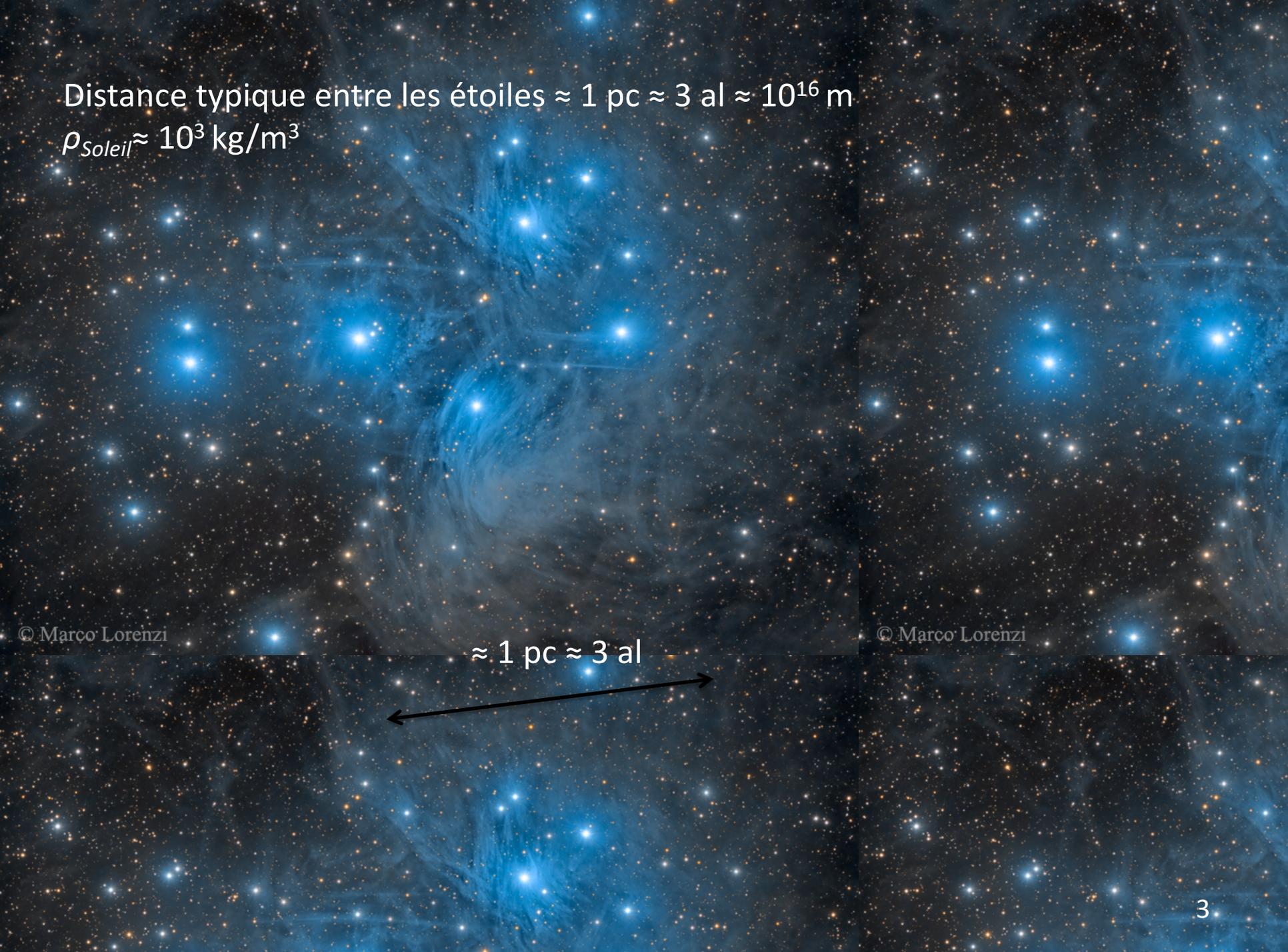
FACULTÉ DES SCIENCES

Cosmologie: étude de l'univers sans son ensemble

- La cosmologie est une science de précision seulement depuis quelques dizaines d'années
- Elle est en constante évolution
- L'univers est neutre => la gravitation domine, c'est le cadre idéal pour appliquer les équations de la Relativité Générale d'Albert Einstein
- L'univers est composé de matière baryonique (= atomes), mais pas que...

Distance typique entre les étoiles $\approx 1 \text{ pc} \approx 3 \text{ al} \approx 10^{16} \text{ m}$

$\rho_{\text{Soleil}} \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$



© Marco Lorenzi

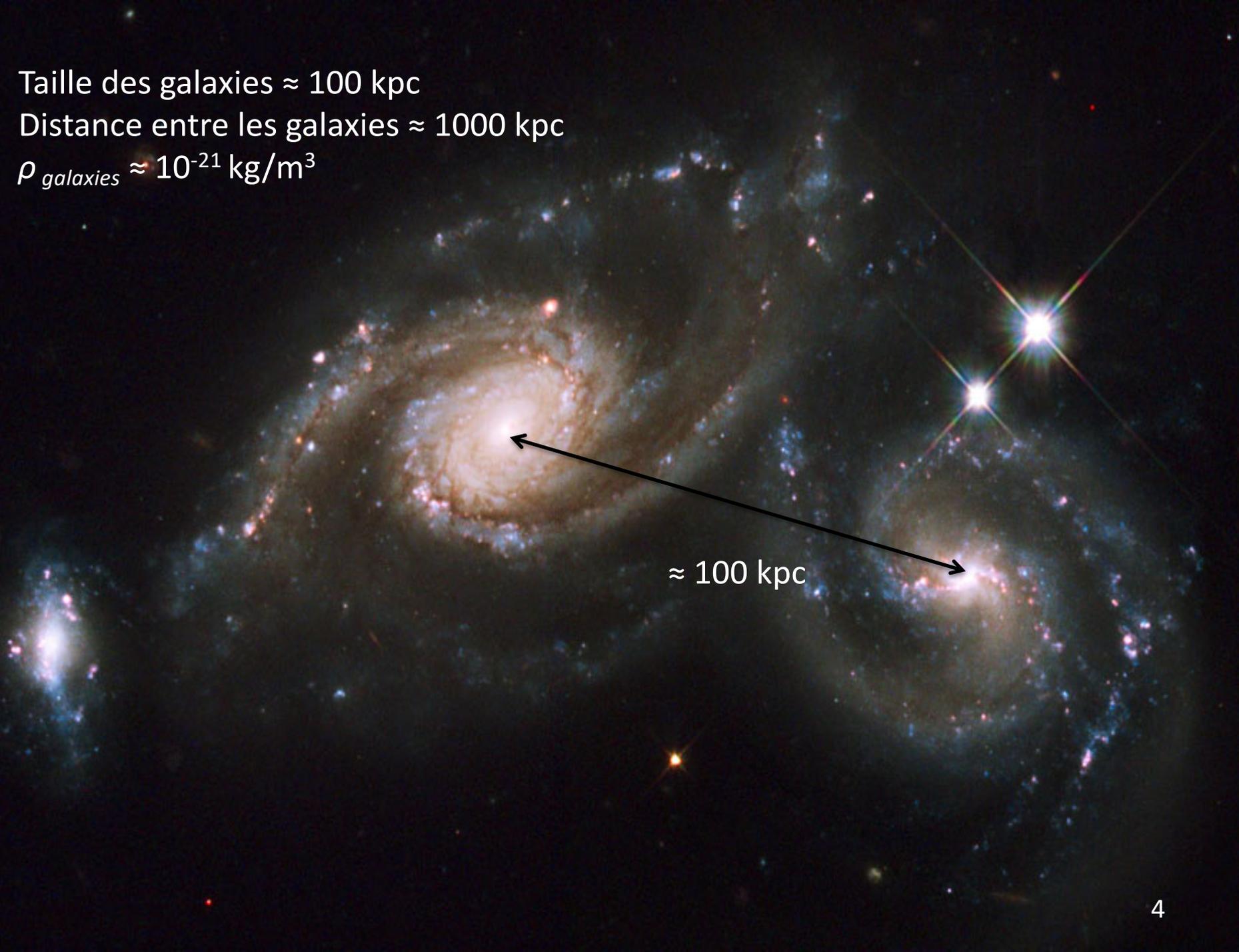
© Marco Lorenzi

$\approx 1 \text{ pc} \approx 3 \text{ al}$

Taille des galaxies ≈ 100 kpc

Distance entre les galaxies ≈ 1000 kpc

$\rho_{galaxies} \approx 10^{-21} \text{ kg/m}^3$



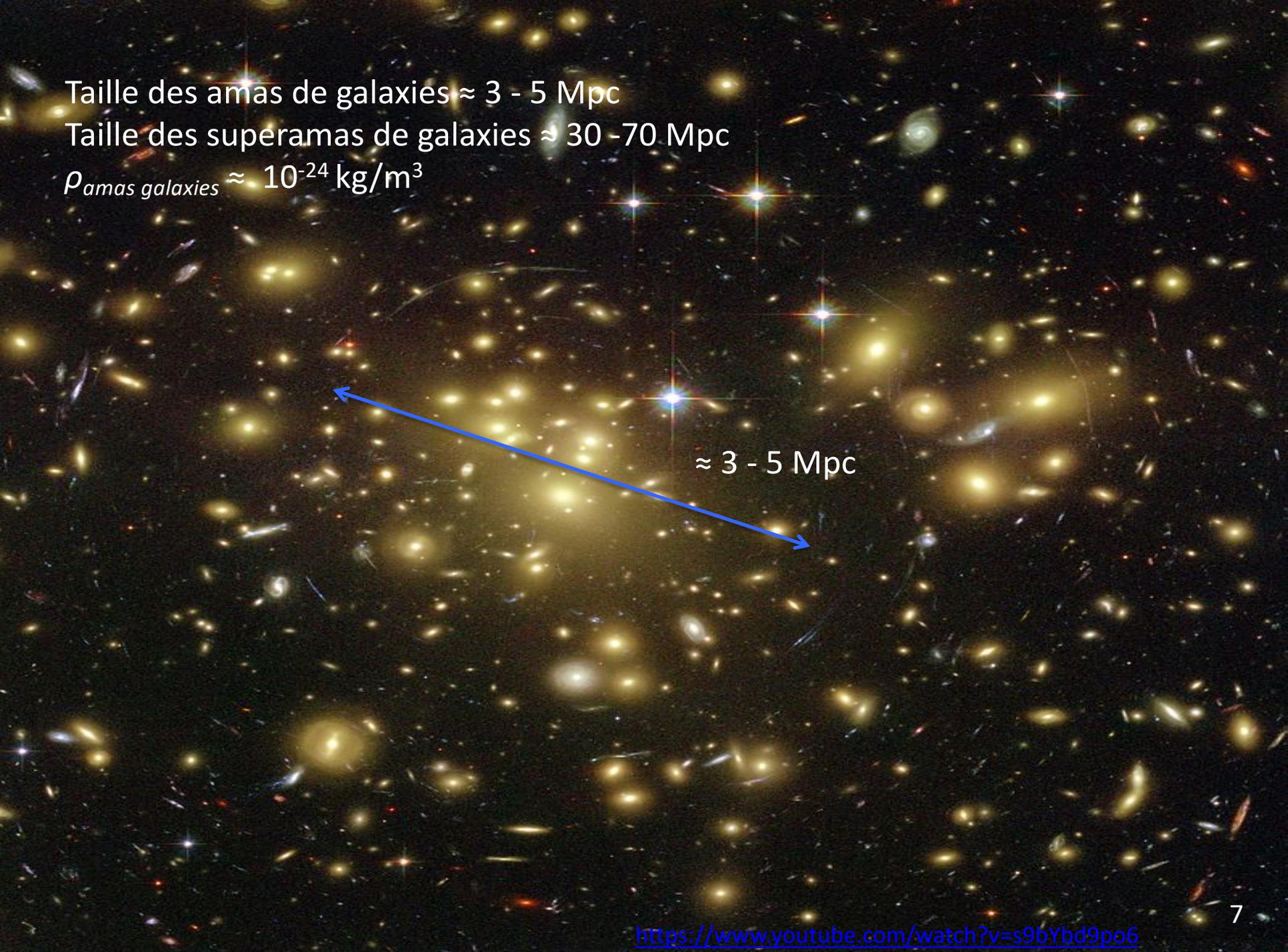




Taille des amas de galaxies $\approx 3 - 5$ Mpc

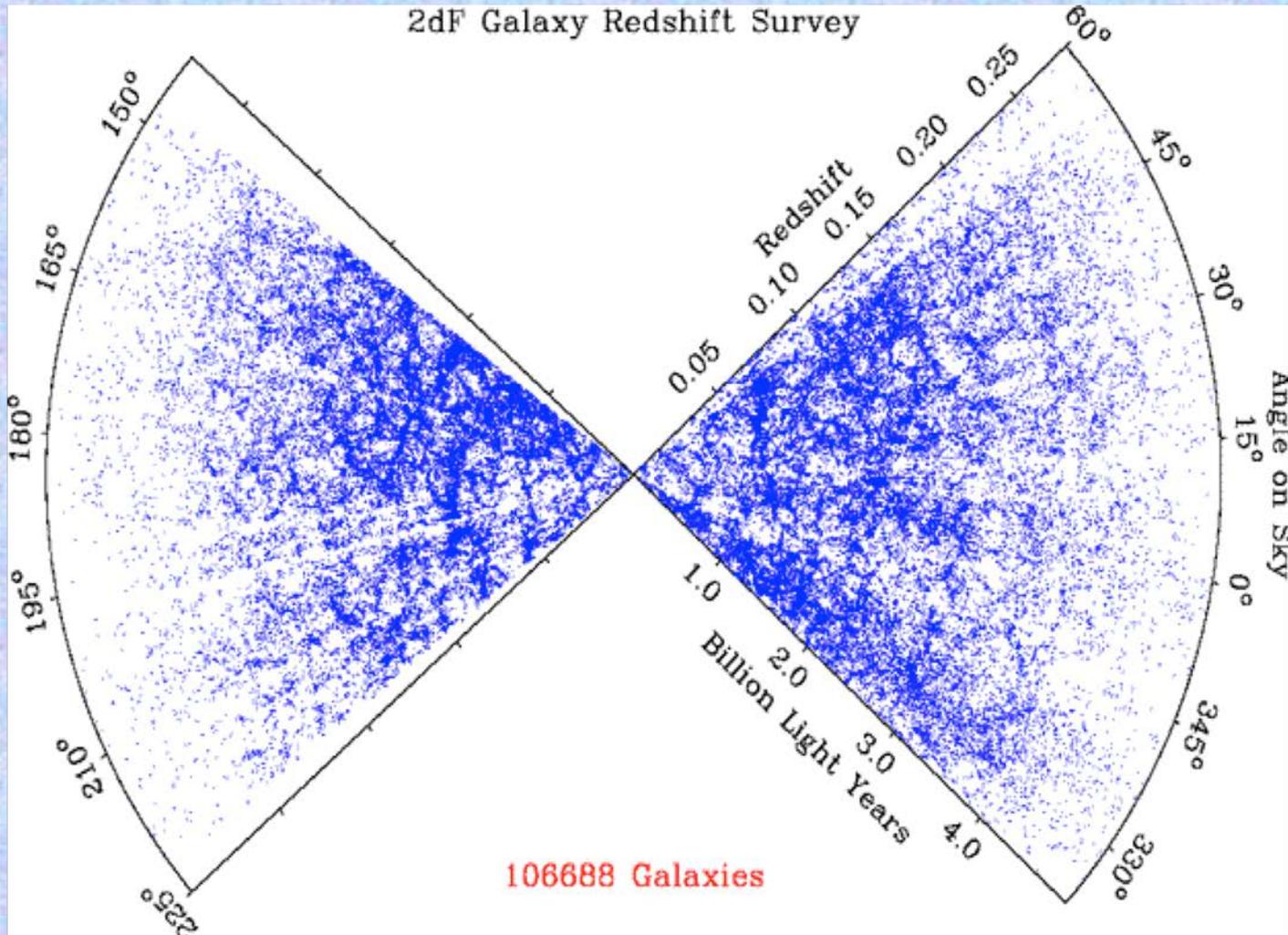
Taille des superamas de galaxies $\approx 30 - 70$ Mpc

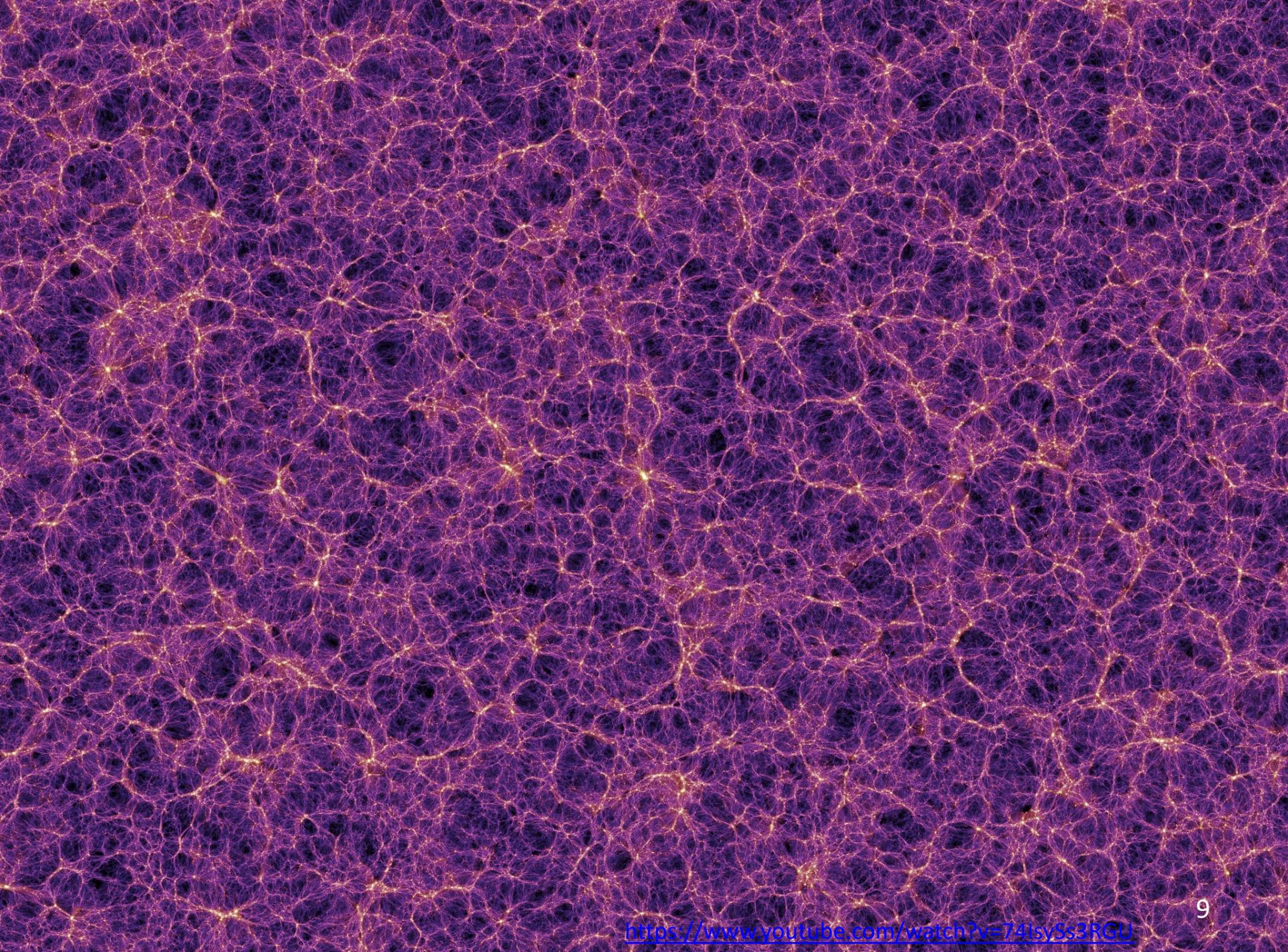
$\rho_{amas\ galaxies} \approx 10^{-24} \text{ kg/m}^3$

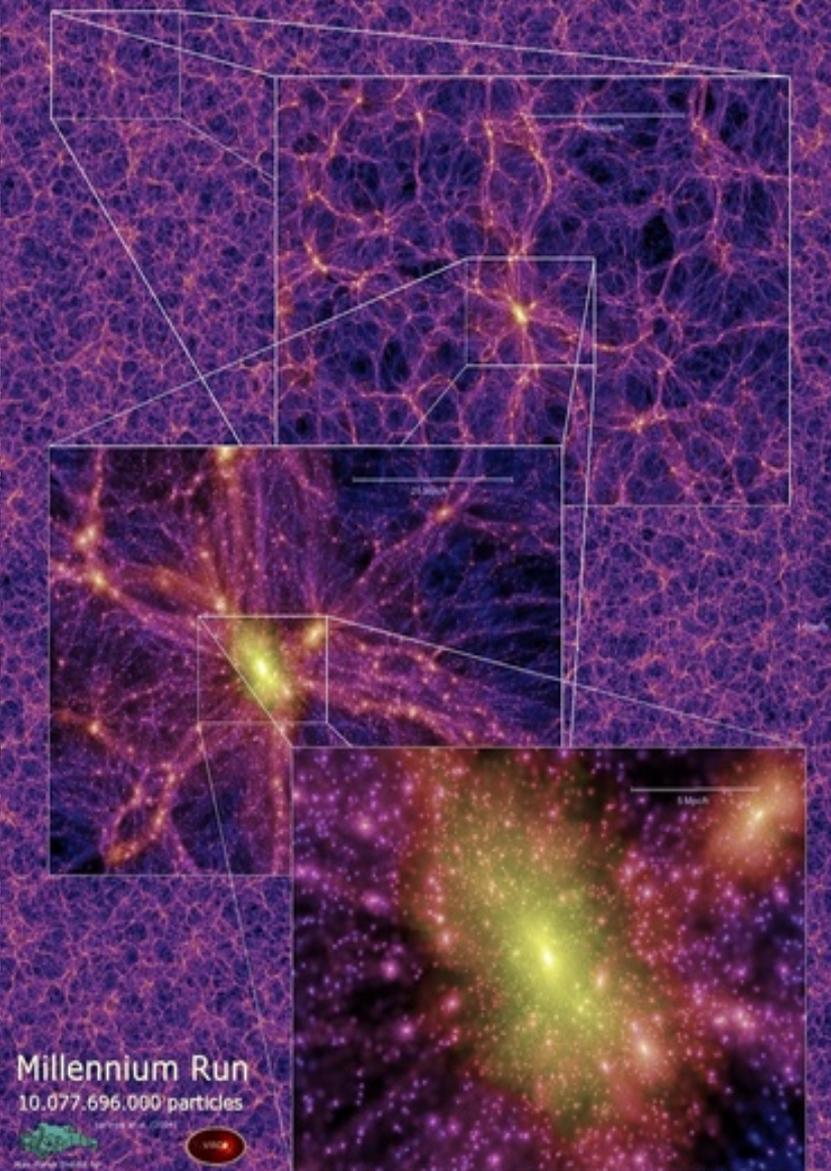
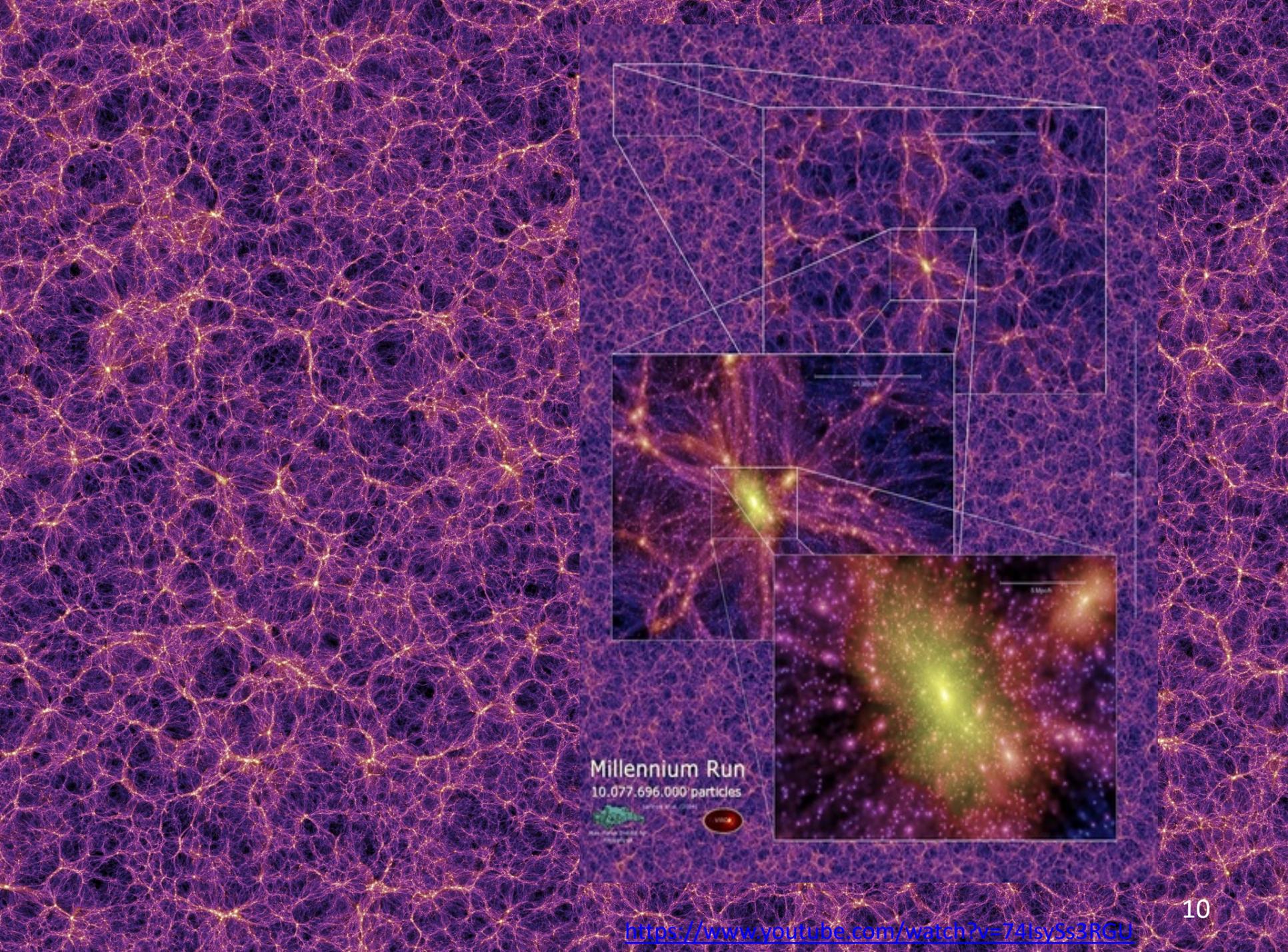
A field of galaxies, primarily yellow and white, with some blue and red galaxies scattered throughout. A blue double-headed arrow is drawn across the field, indicating a scale. The text " $\approx 3 - 5$ Mpc" is placed next to the arrow.

$\approx 3 - 5$ Mpc

À des échelles dépassant le Gpc on retrouve une structure en « maille de filet », bien reproduite par les simulations $\rho_{univers} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \approx \rho_{critique}$





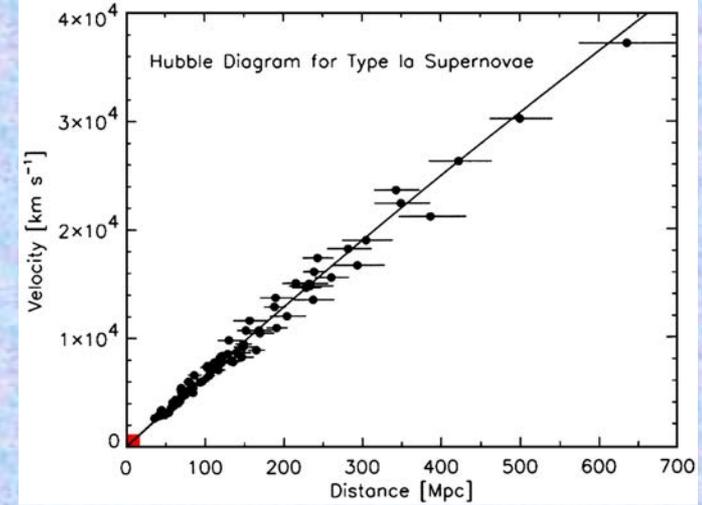


Millennium Run
10,077,696,000 particles



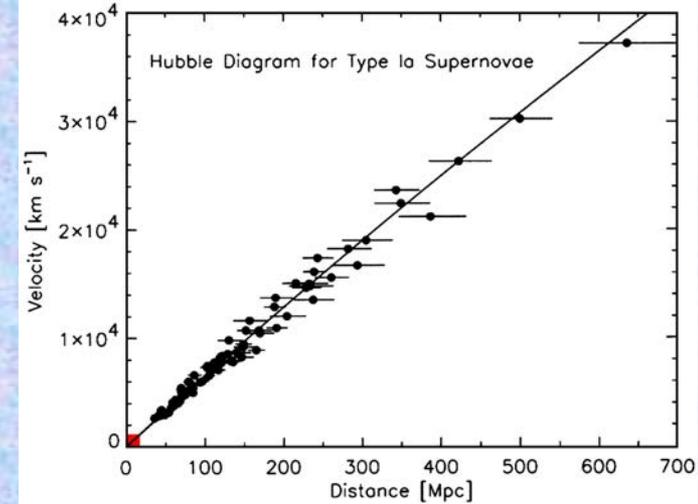
L'univers est en expansion

- Observation des premières galaxies par E. Hubble (1924)



L'univers est en expansion

- Observation des premières galaxies par E. Hubble (1924)

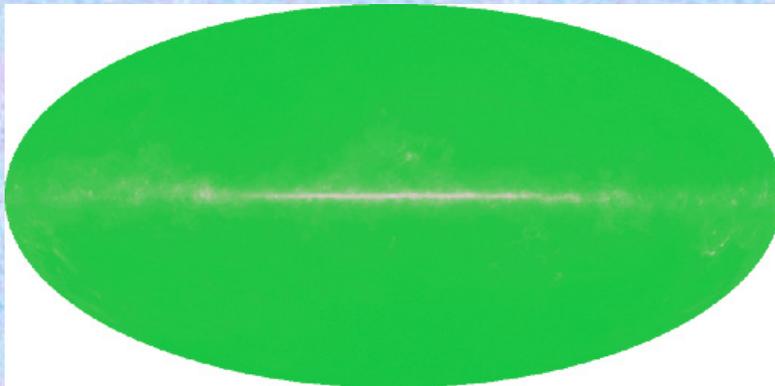


L'univers est passé par une phase très chaude (Big Bang)

- Détection du fond diffus cosmologique (CMB)

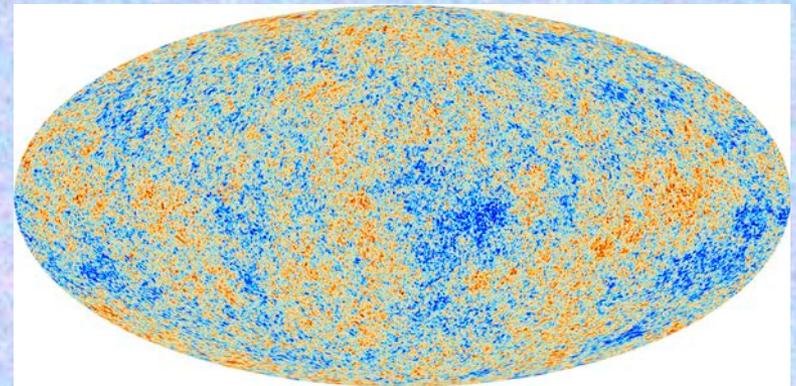
parfaitement homogène et isotrope: $T = 2,7 \text{ }^\circ\text{K}$
(Penzias et Wilson, 1964)

COBE



...mais avec des fluctuations d'environ $10^{-5} \text{ }^\circ\text{K}$
(Mather et Smoot, 1992)

Planck



- Abondances d'Hélium dans l'univers (Steigman, 2006)

Ce que nous savons de notre univers:

- Neutre : la gravitation domine, cadre idéal pour appliquer les équations de la Relativité Générale.

Ce que nous savons de notre univers:

- Neutre : la gravitation domine, cadre idéal pour appliquer les équations de la Relativité Générale.
- Homogène et isotrope (3^{ème} révolution copernicienne)
- En expansion (3^{ème} révolution copernicienne)
- Dilué : $\rho_{tot} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
Mais si on estime la densité à partir de la matière lumineuse on arrive à
 $\rho_{lum} \approx 10^{-29} \text{ kg/m}^3$

Ce que nous savons de notre univers:

- Neutre : la gravitation domine, cadre idéal pour appliquer les équations de la Relativité Générale.

- Homogène et isotrope (3^{ème} révolution copernicienne)

- En expansion (3^{ème} révolution copernicienne)

- Dilué : $\rho_{tot} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

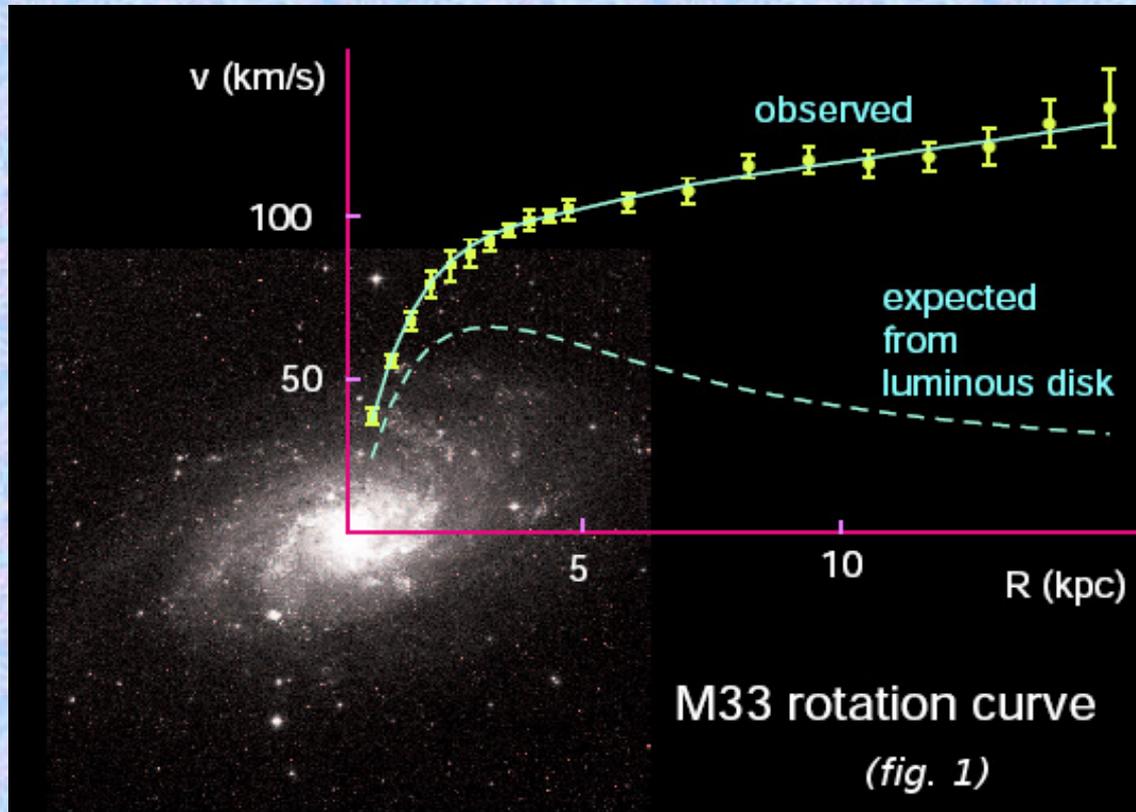
Mais si on estime la densité à partir de la matière lumineuse on arrive à

$$\rho_{lum} \approx 10^{-29} \text{ kg/m}^3$$

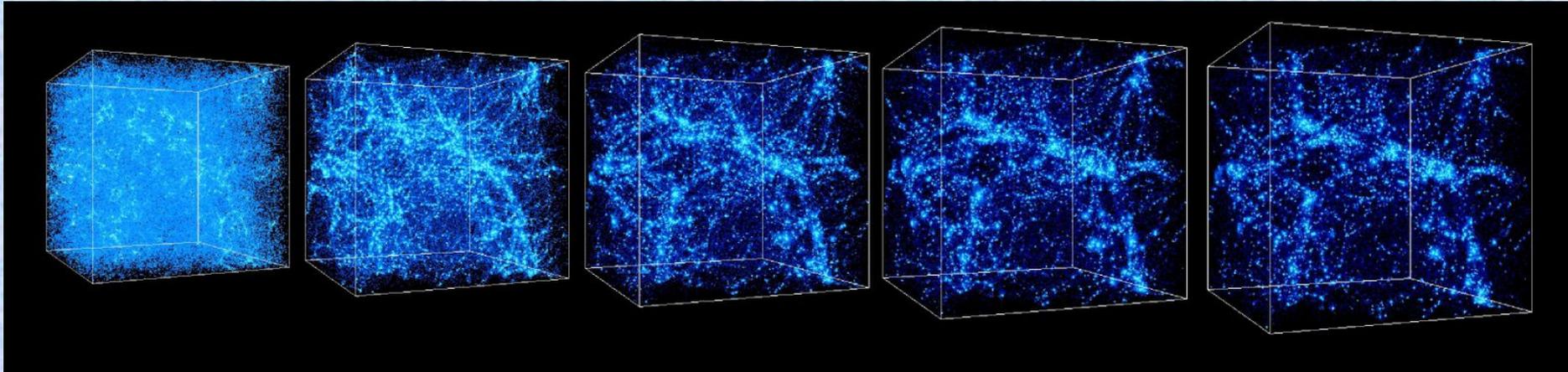
=> Il doit y avoir de la matière/énergie que nous ne détectons pas directement
(4^{ème} révolution copernicienne)

Indices de la présence de « matière noire »

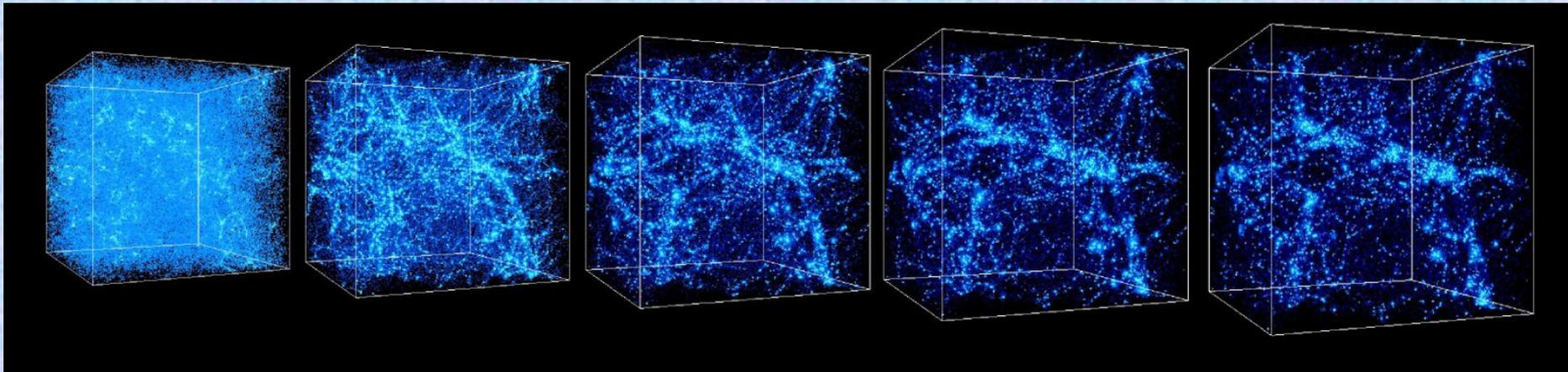
1. Vitesses des galaxies dans les amas: trop élevées pour qu'elles restent gravitationnellement liées (Fritz Zwicky, 1933)
1. Courbes de rotation des nuages de gaz dans les galaxies (Vera Rubin, années 1970)



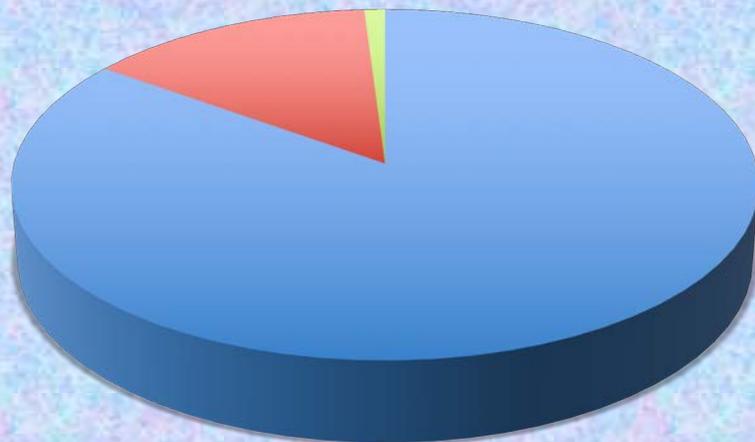
3. Formation des structures: si on ne tient pas compte du 85% de matière noire constituant la masse de l'univers, les simulations ne reproduisent pas la structure à observée large échelle (Millenium, 2013).



3. Formation des structures: si on ne tient pas compte du 85% de matière noire constituant la masse de l'univers, les simulations ne reproduisent pas la structure à observée large échelle (Millenium, 2013).



Matière dans l'Univers



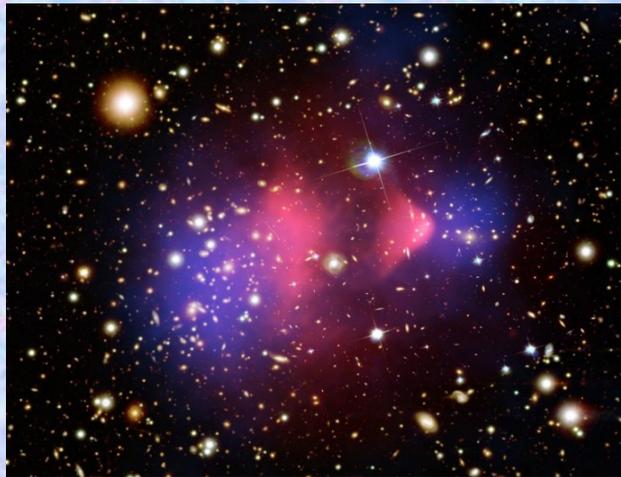
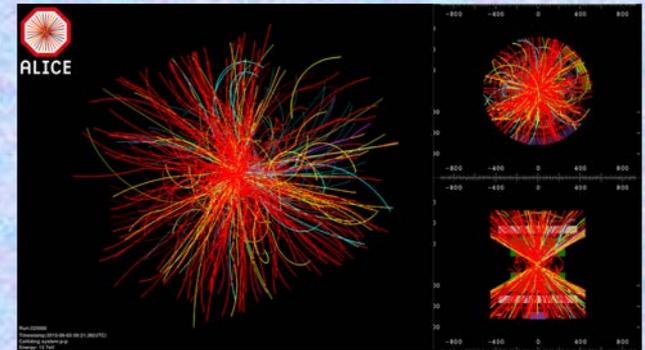
■ Matière noire	85%
■ Atomes non lumineux	14%
■ Atomes lumineux	1%

La Matière Noire n'interagit pas électromagnétiquement

- Il ne s'agit pas de particules ordinaires (par exemple les électrons ou les nucléons)

=> Chasse à la particule

- Pas de rayonnement => pas de dissipation d'énergie mécanique: elle ne peut pas former des « grumeaux » en convertissant son énergie cinétique en radiation



<https://www.youtube.com/watch?v=2DoPAeU3a6Y>

- Elle est difficile à détecter, car elle ne peut ni émettre des ondes électromagnétiques, ni les réfléchir, ni les absorber

Ce que nous savons de notre univers:

- Neutre : la gravitation domine, cadre idéal pour appliquer les équations de la Relativité Générale.

- Homogène et isotrope (3^{ème} révolution copernicienne)

- En expansion (3^{ème} révolution copernicienne)

- Dilué : $\rho_{tot} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$.

Mais si on estime la densité à partir de la matière lumineuse on arrive à

$$\rho_{lum} \approx 10^{-29} \text{ kg/m}^3$$

✓ 100 fois plus de **matière non visible** (14% matière baryonique non lumineuse et 85% matière noire) que de matière lumineuse => $\rho_{mat} \approx 10^{-27} \text{ kg/m}^3$

(4^{ème} révolution copernicienne)

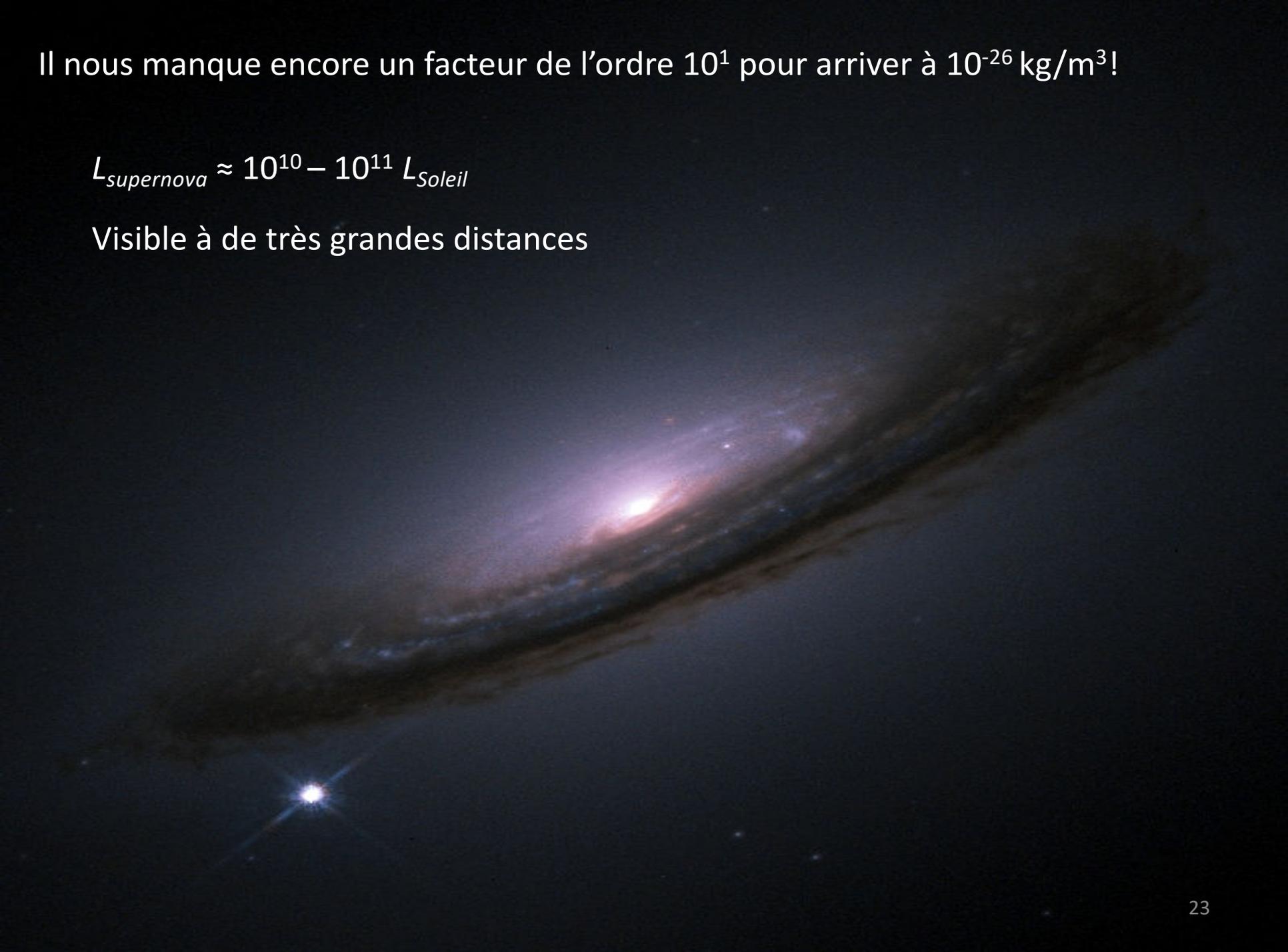
Il nous manque encore un facteur de l'ordre 10^1 pour arriver à 10^{-26} kg/m³!

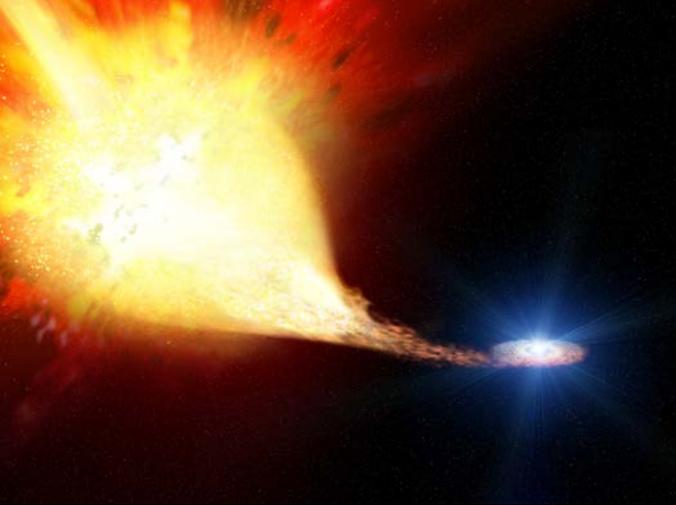


Il nous manque encore un facteur de l'ordre 10^1 pour arriver à 10^{-26} kg/m³!

$$L_{\text{supernova}} \approx 10^{10} - 10^{11} L_{\text{Soleil}}$$

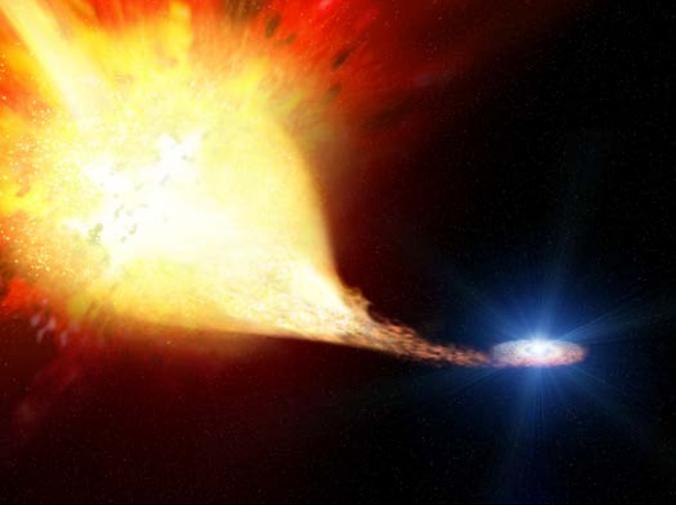
Visible à de très grandes distances





Sn 1a: la luminosité L [W] est connue car liée à la durée de l'explosion

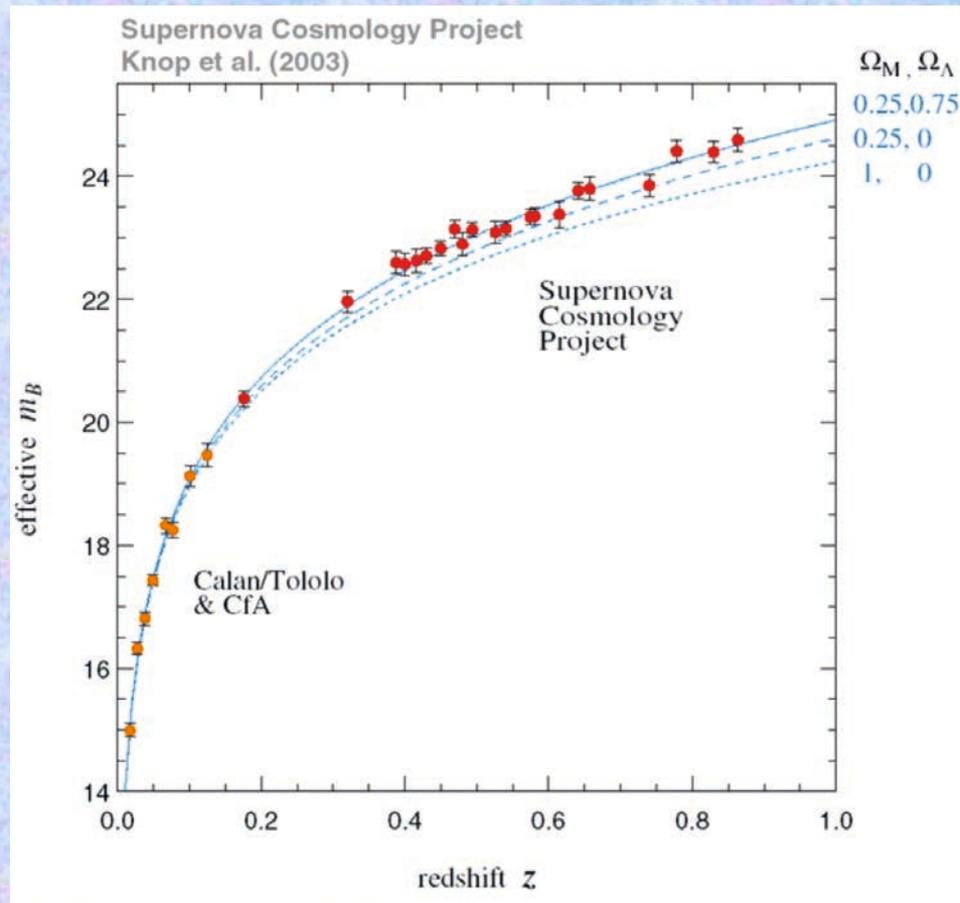
- Mesure du flux lumineux (*magnitude*) f [W/m²]
=> distance $d^2 = L / 4\pi f$
- Mesure du redshift z (vitesse d'expansion)

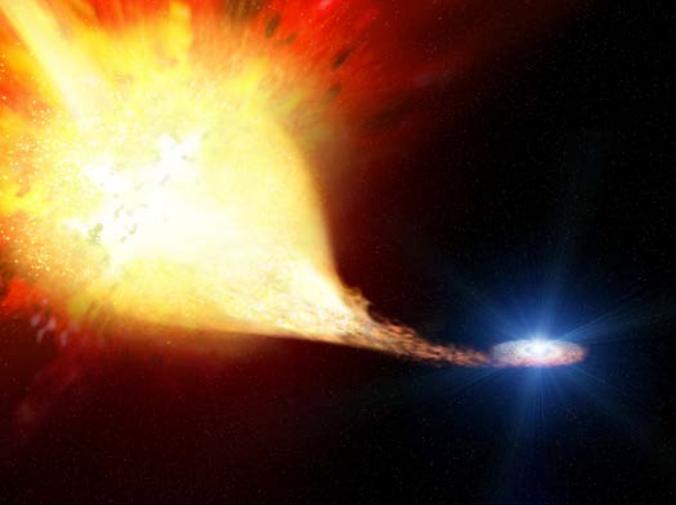


Sn 1a: la luminosité L [W] est connue car liée à la durée de l'explosion

- Mesure du flux lumineux (*magnitude*) f [W/m²]
=> distance $d^2 = L / 4\pi f$
- Mesure du redshift z (vitesse d'expansion)

- Si l'univers contenait uniquement de la matière, son expansion devrait être décélérée (courbe pointillée).
- À de grandes distances, la relation entre d et z est mieux modélisée par un univers en expansion accélérée! (courbe solide) [Perlmutter et al, 1998]

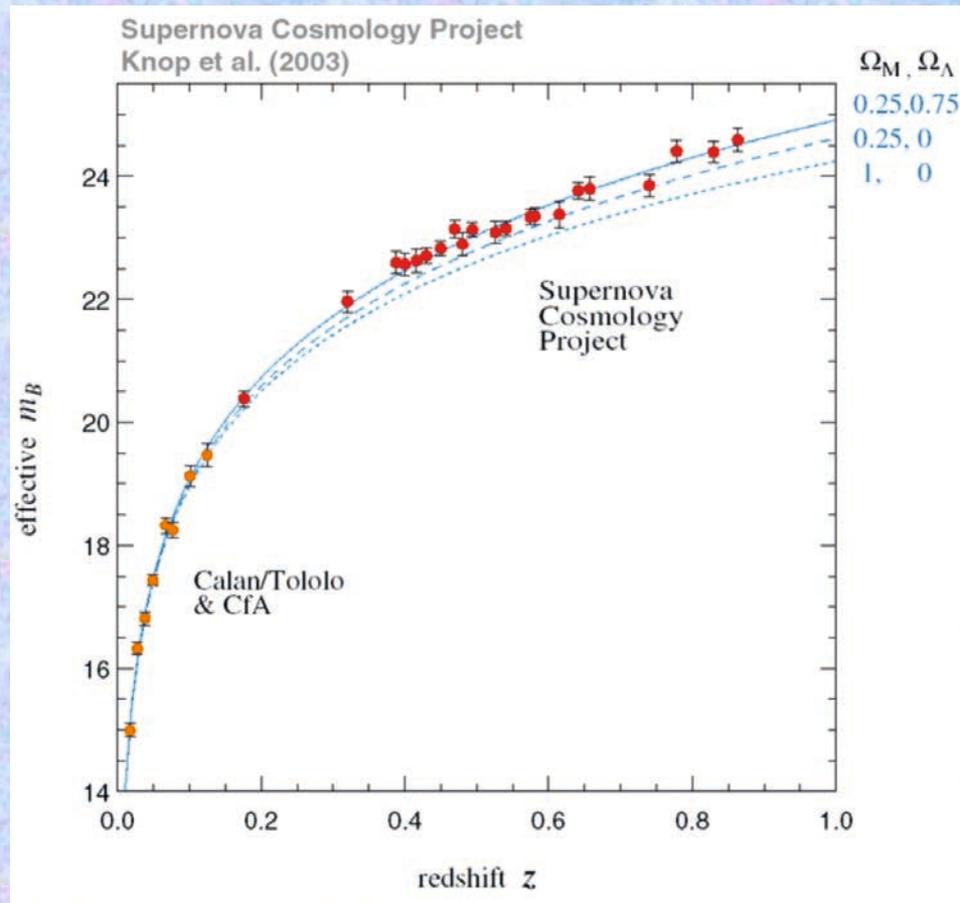
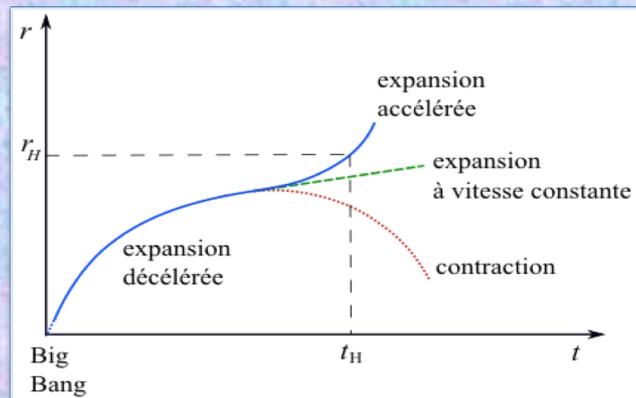




Sn 1a: la luminosité L [W] est connue car liée à la durée de l'explosion

- Mesure du flux lumineux (*magnitude*) f [W/m²]
=> distance $d^2 = L / 4\pi f$
- Mesure du redshift z (vitesse d'expansion)

- Si l'univers contenait uniquement de la matière, son expansion devrait être décélérée (courbe pointillée).
- À de grandes distances, la relation entre d et z est mieux modélisée par un univers en expansion accélérée! (courbe solide) [Perlmutter et al, 1998]

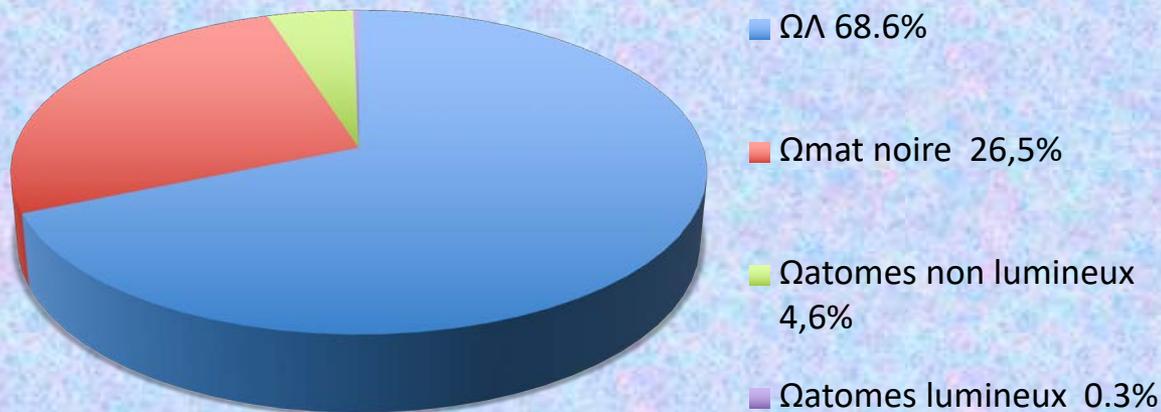


L'origine de l'énergie qui permet l'accélération de l'univers est inconnue et, pour cette raison, elle est appelée « **énergie noire** » (ou énergie « du vide »)

L'accélération de l'univers est modélisée par un terme de **densité d'énergie constante** (Λ) dans les équations cosmologiques:

$$\Omega_M = \rho_M / \rho_{tot} \quad \Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_{tot}$$

Energie totale de l'univers



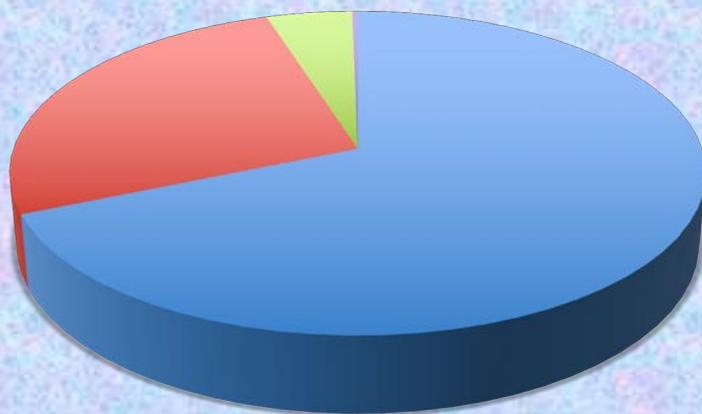
L'origine de l'énergie qui permet l'accélération de l'univers est inconnue et, pour cette raison, elle est appelée « **énergie noire** » (ou énergie « du vide »)

L'accélération de l'univers est modélisée par un terme de **densité d'énergie constante** (Λ) dans les équations cosmologiques:

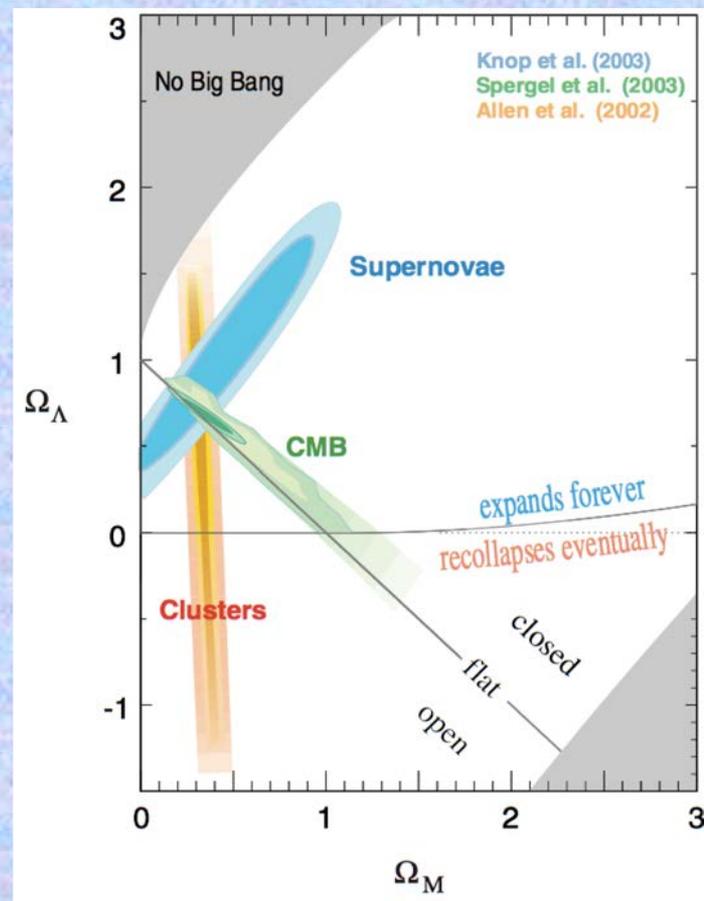
$$\Omega_M = \rho_M / \rho_{tot}$$

$$\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_{tot}$$

Energie totale de l'univers



- Ω_Λ 68.6%
- $\Omega_{mat\ noire}$ 26,5%
- $\Omega_{atomes\ non\ lumineux}$ 4,6%
- $\Omega_{atomes\ lumineux}$ 0.3%



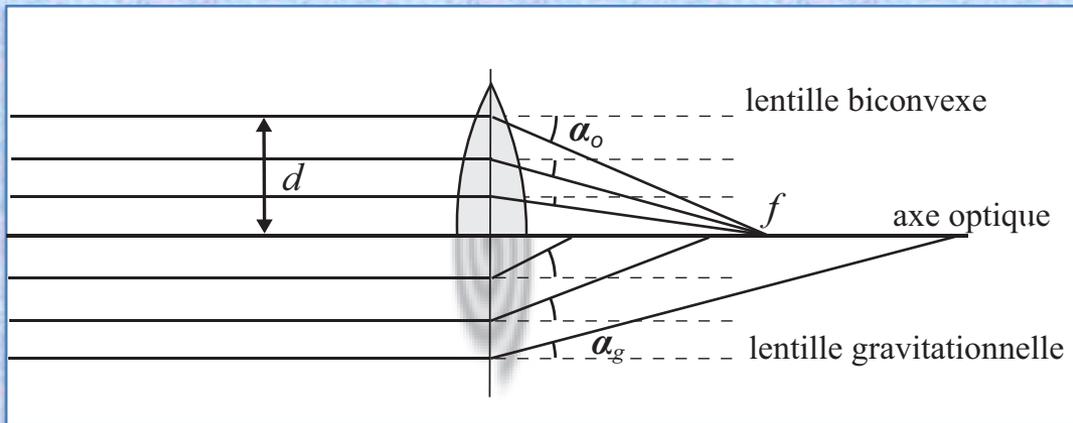
Ce que nous savons de notre univers:

- Neutre : la gravitation domine, cadre idéal pour appliquer les équations de la Relativité Générale.
- Homogène et isotrope (3^{ème} révolution copernicienne)
- En expansion (3^{ème} révolution copernicienne)
- Dilué : $\rho_{tot} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$.
Mais si on estime la densité à partir de la matière lumineuse on arrive à
 $\rho_{lum} \approx 10^{-29} \text{ kg/m}^3$

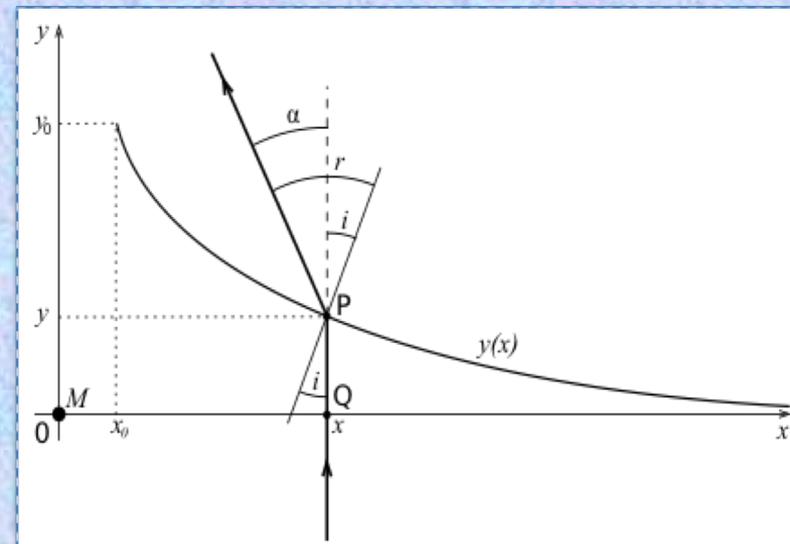
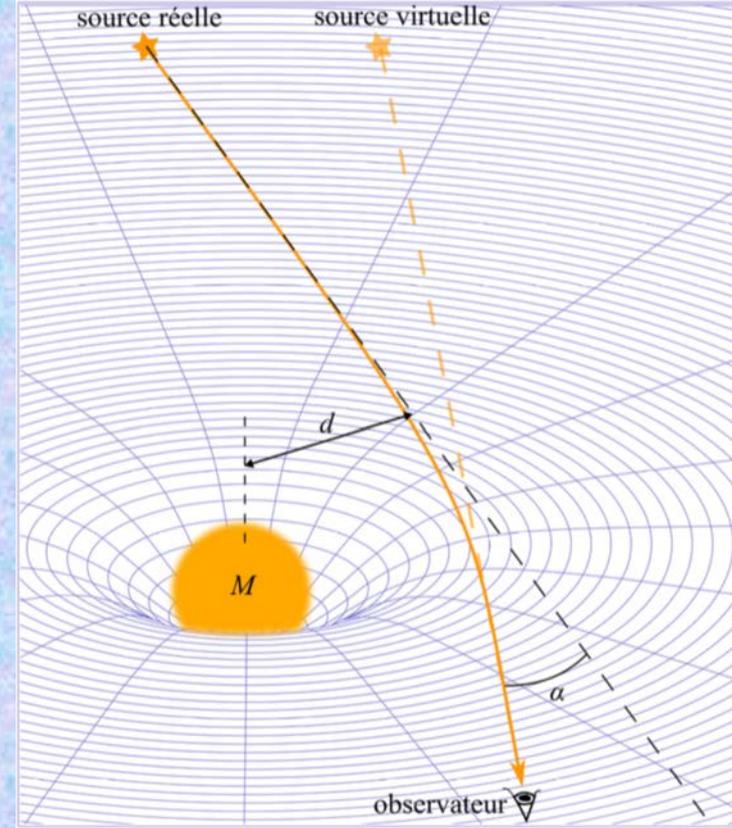
Ce que nous savons de notre univers:

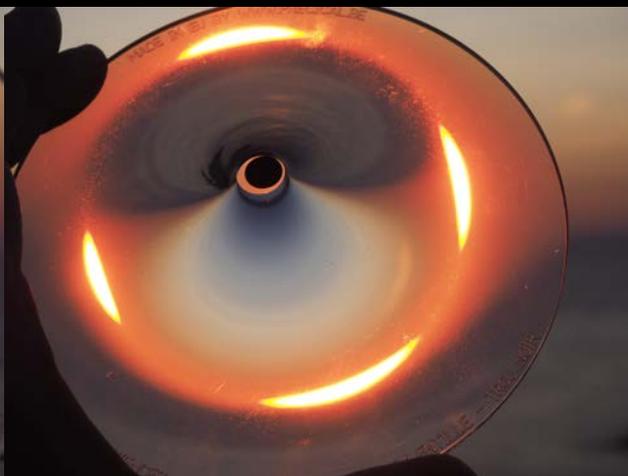
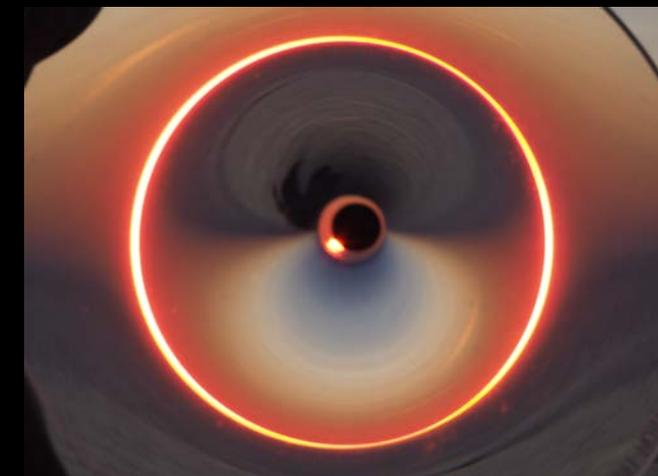
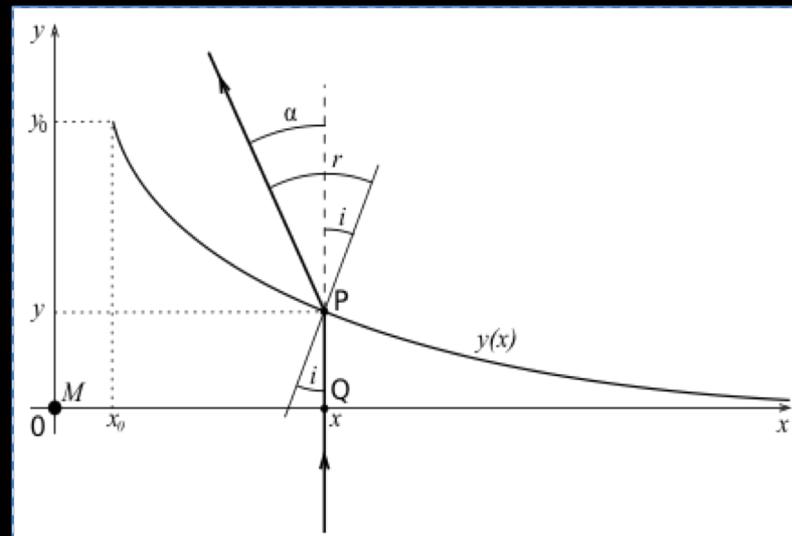
- Neutre : la gravitation domine, cadre idéal pour appliquer les équations de la Relativité Générale.
- Homogène et isotrope (3^{ème} révolution copernicienne)
- En expansion accélérée (3^{ème} + 5^{ème} révolution copernicienne)
- Dilué : $\rho_{tot} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$.
Mais si on estime la densité à partir de la matière lumineuse on arrive à
 $\rho_{lum} \approx 10^{-29} \text{ kg/m}^3$
 - ✓ 100 fois plus de **matière non lumineuse** que de matière lumineuse
 $\rho_{mat} \approx 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ (4^{ème} révolution copernicienne)
 - ✓ 10 fois plus d' « **énergie noire** » que de énergie-matière
 $\rho_{tot} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ (5^{ème} révolution copernicienne)

- Une simple analyse dimensionnelle permet de trouver l'angle de déflexion $\alpha \Rightarrow$ la solution la plus simple est proportionnelle à $1/d$ (S5, ex 1)

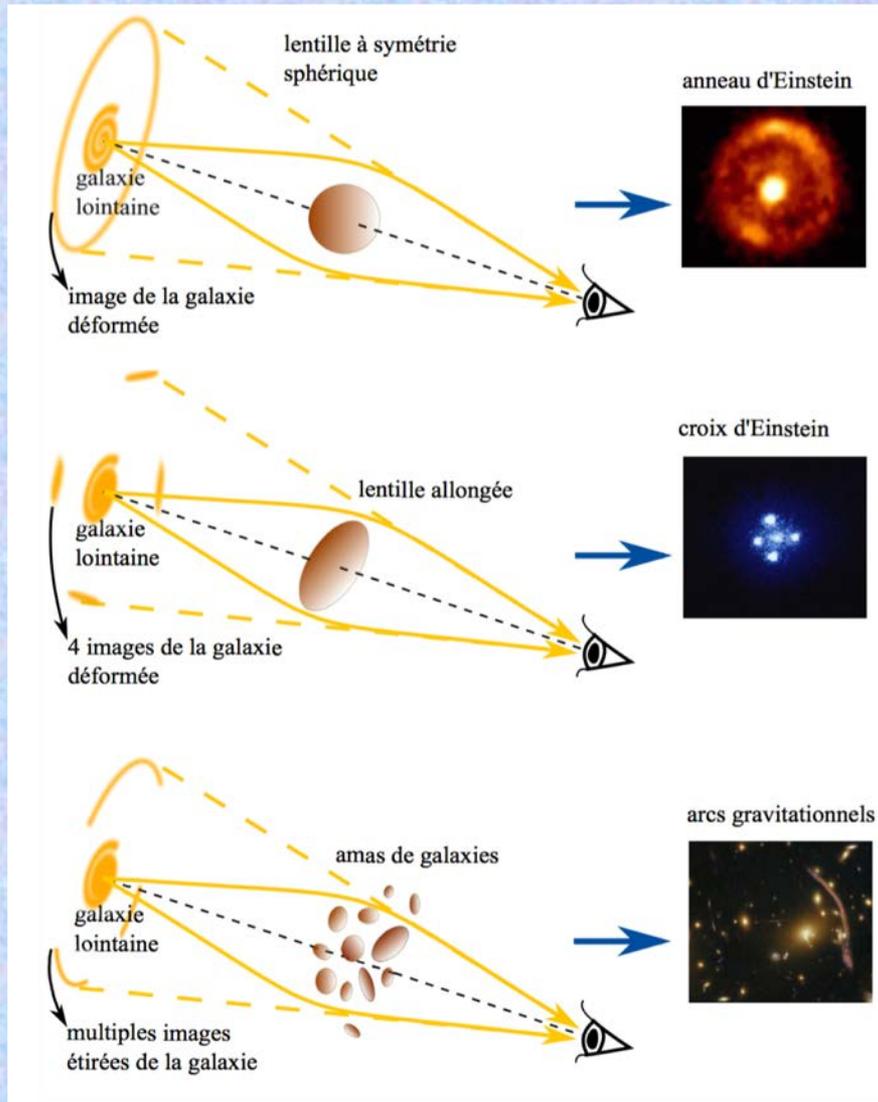


- Quelle forme devrait avoir une lentille optique pour simuler une lentille gravitationnelle?
 \Rightarrow Simple intégration donnant un profil de type $y(x) = y_0 \ln(x)$ (S5, ex7)



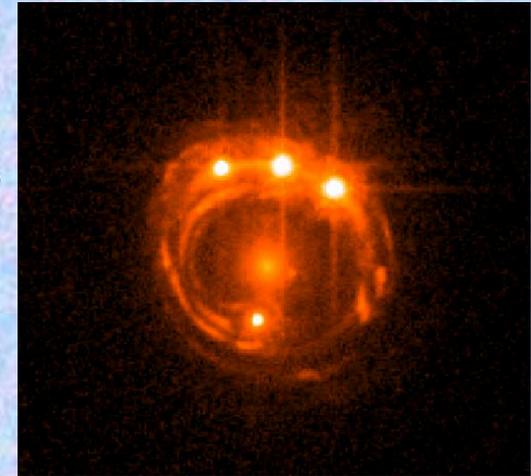


- **Strong lensing:** la lentille est constituée d'une grande concentration de masse (galaxie ou un amas de galaxies)

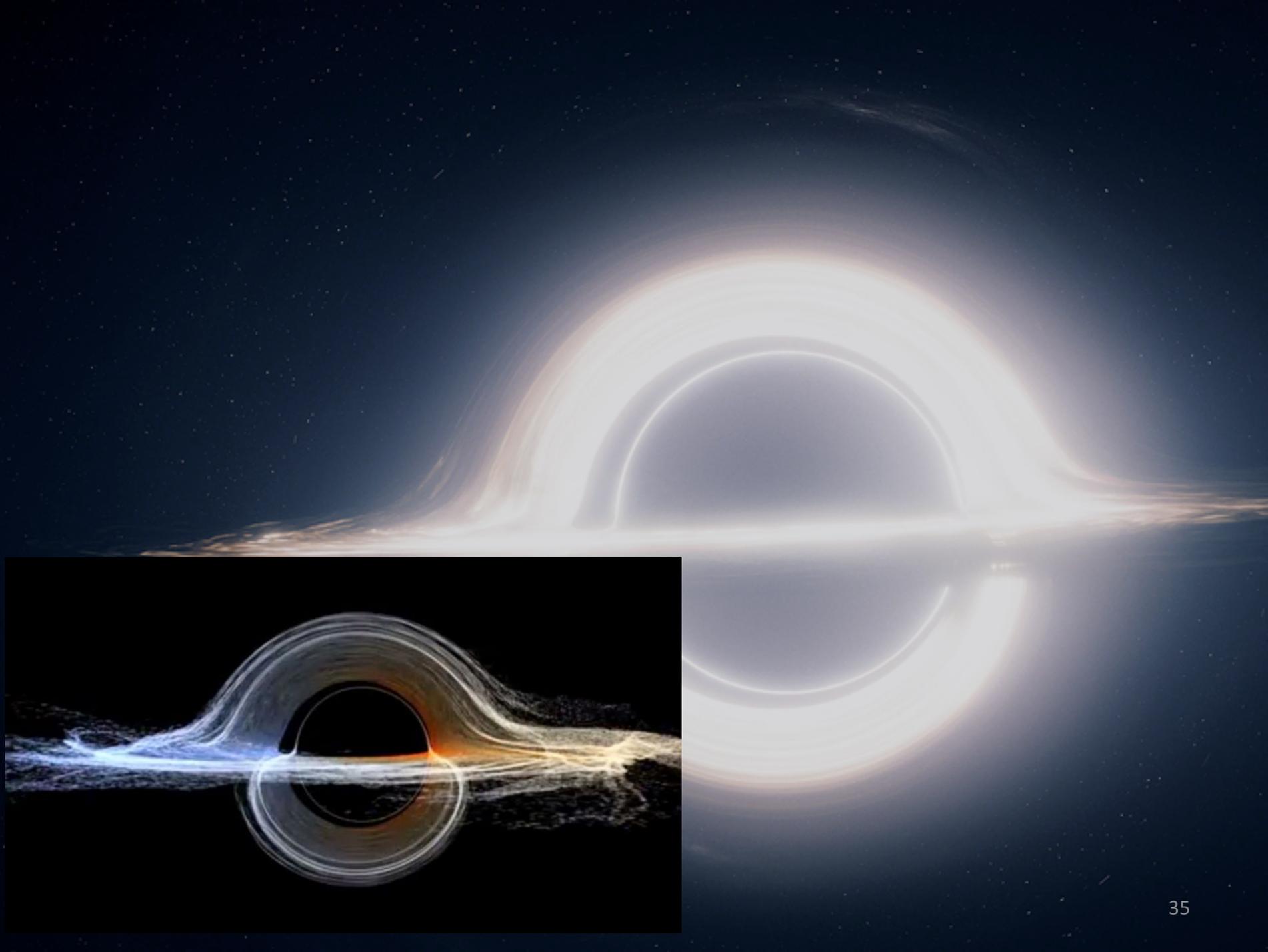
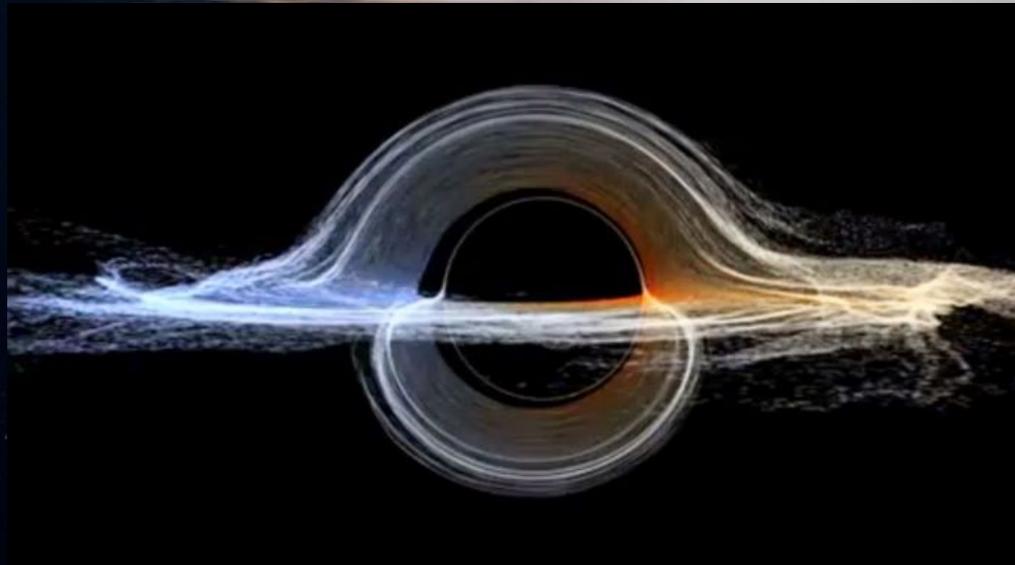


- Visibilité de galaxies lointaines (environ 10 milliards d'al)

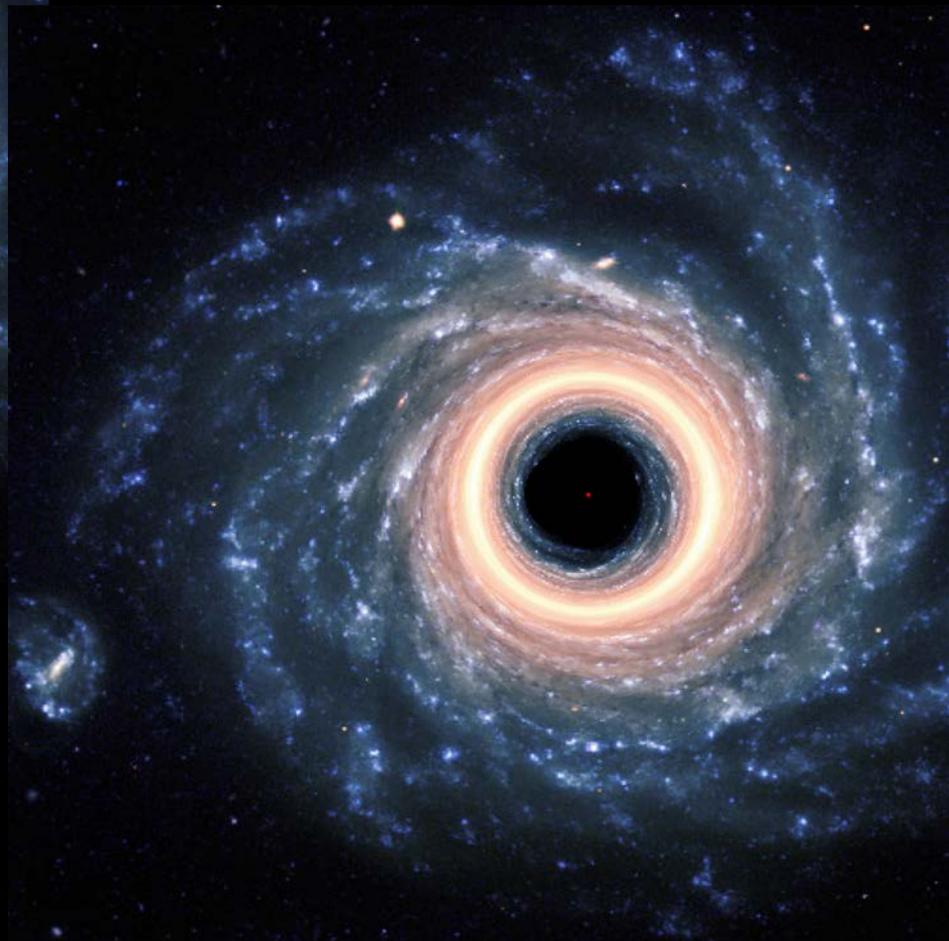
- Reconstruction de la distribution de matière noire

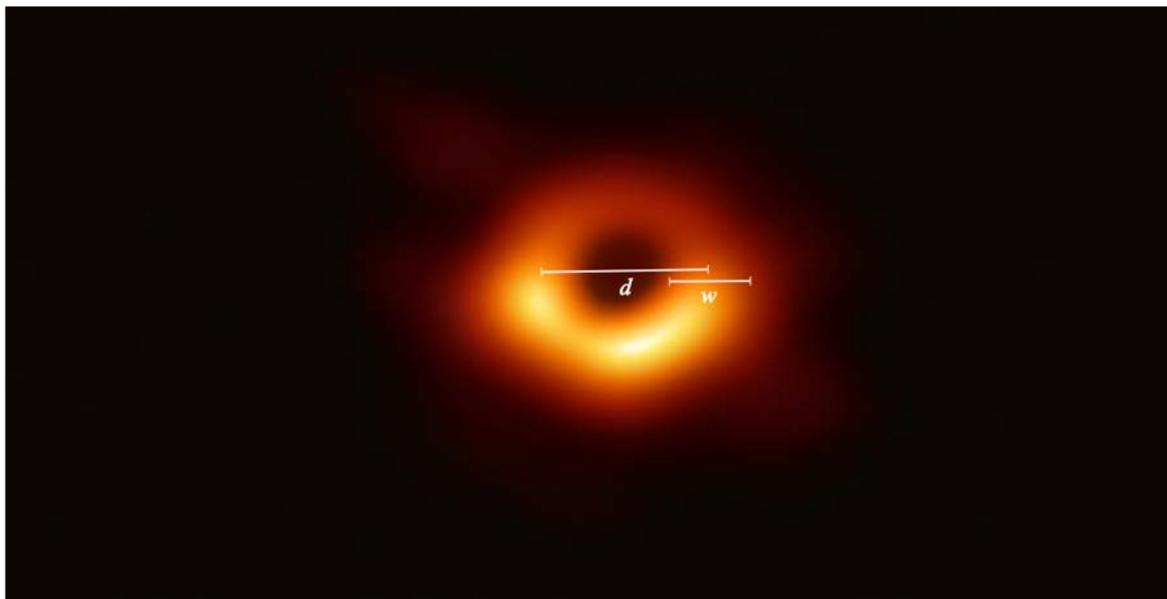
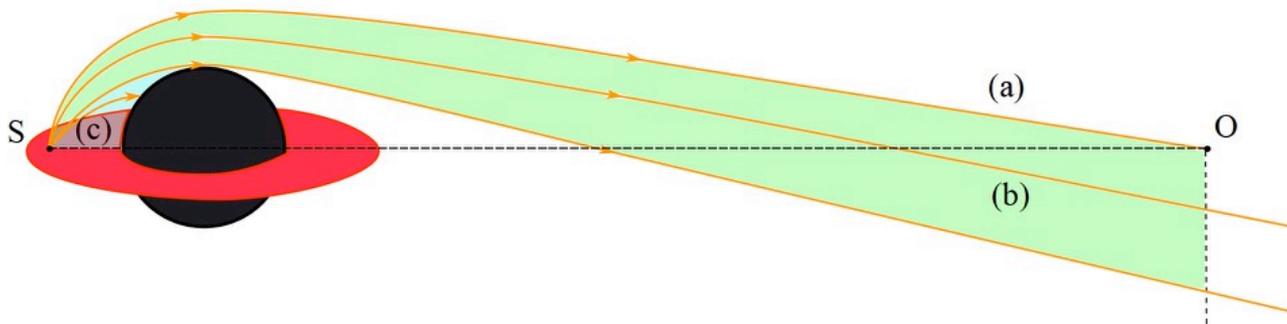
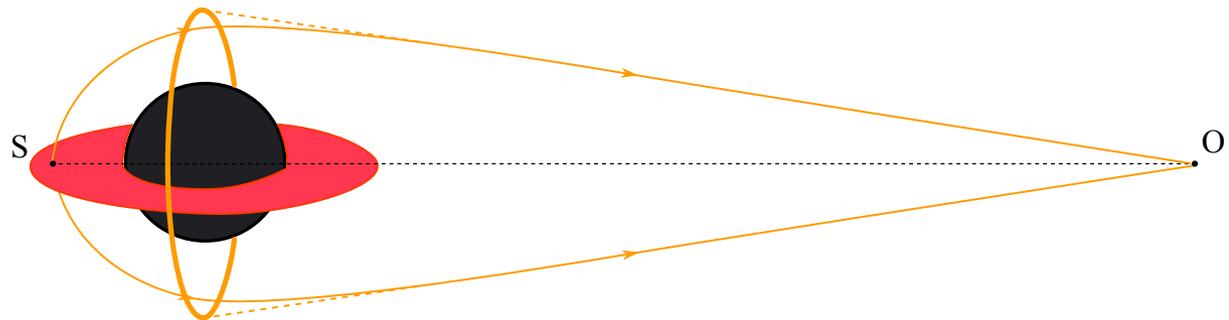




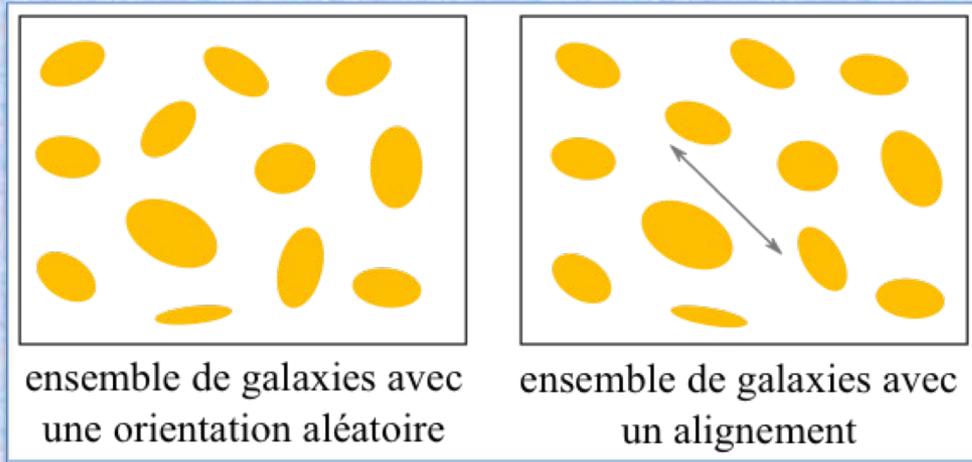




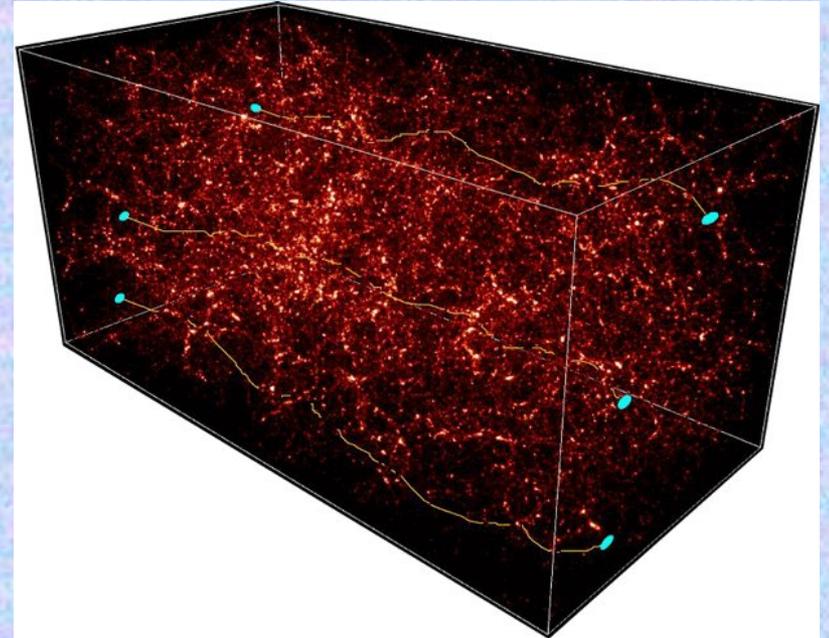




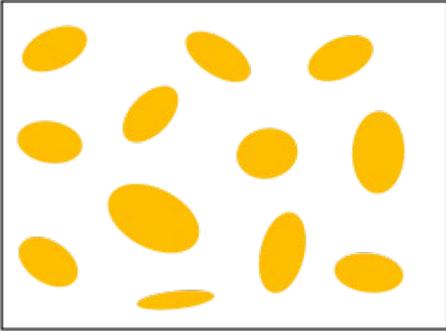
- **Weak lensing:** la matière interstellaire crée de faibles déformations (<1%) sur un grand nombre de galaxies, imperceptibles à l'œil humain.



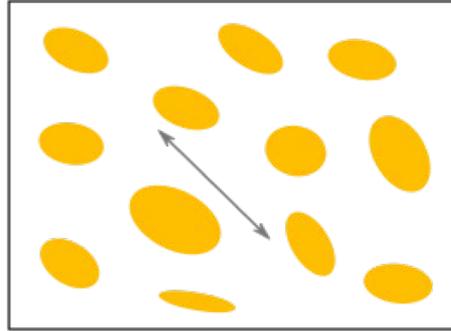
Tout écart à une distribution aléatoire de l'orientation des galaxies est une mesure indirecte de la présence de matière dans une certaine zone du ciel.



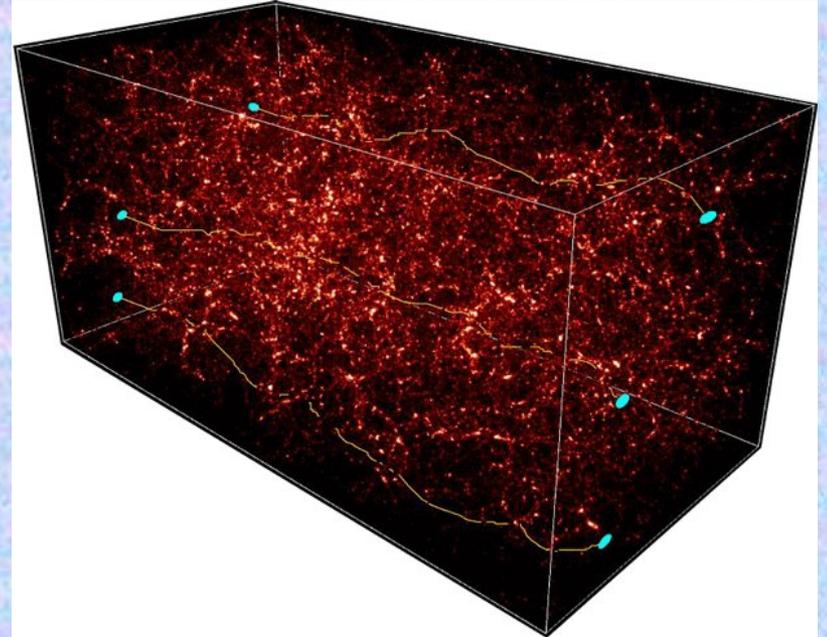
- **Weak lensing:** la matière interstellaire crée de faibles déformations (<1%) sur un grand nombre de galaxies, imperceptibles à l'œil humain.



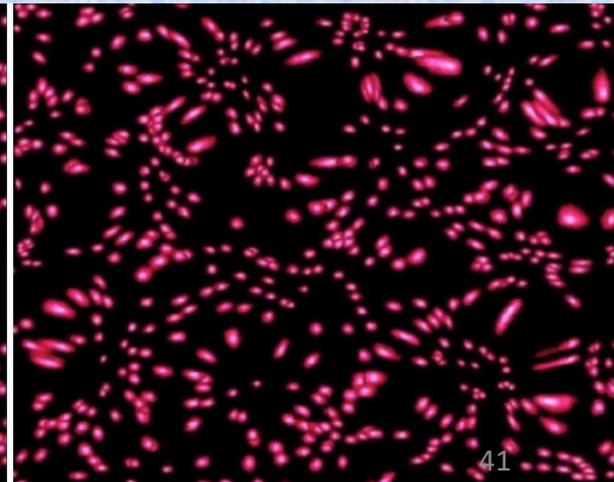
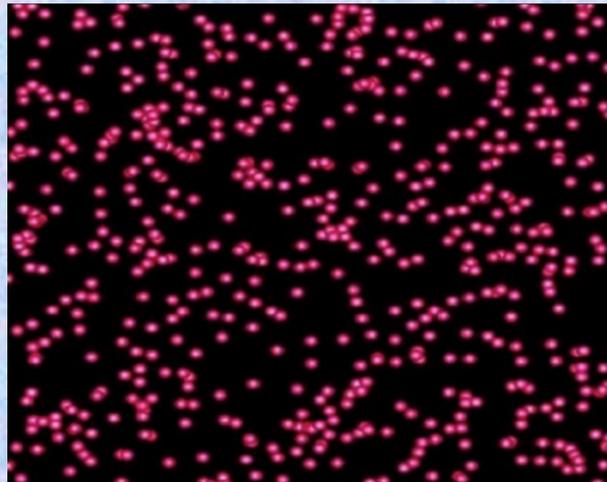
ensemble de galaxies avec une orientation aléatoire



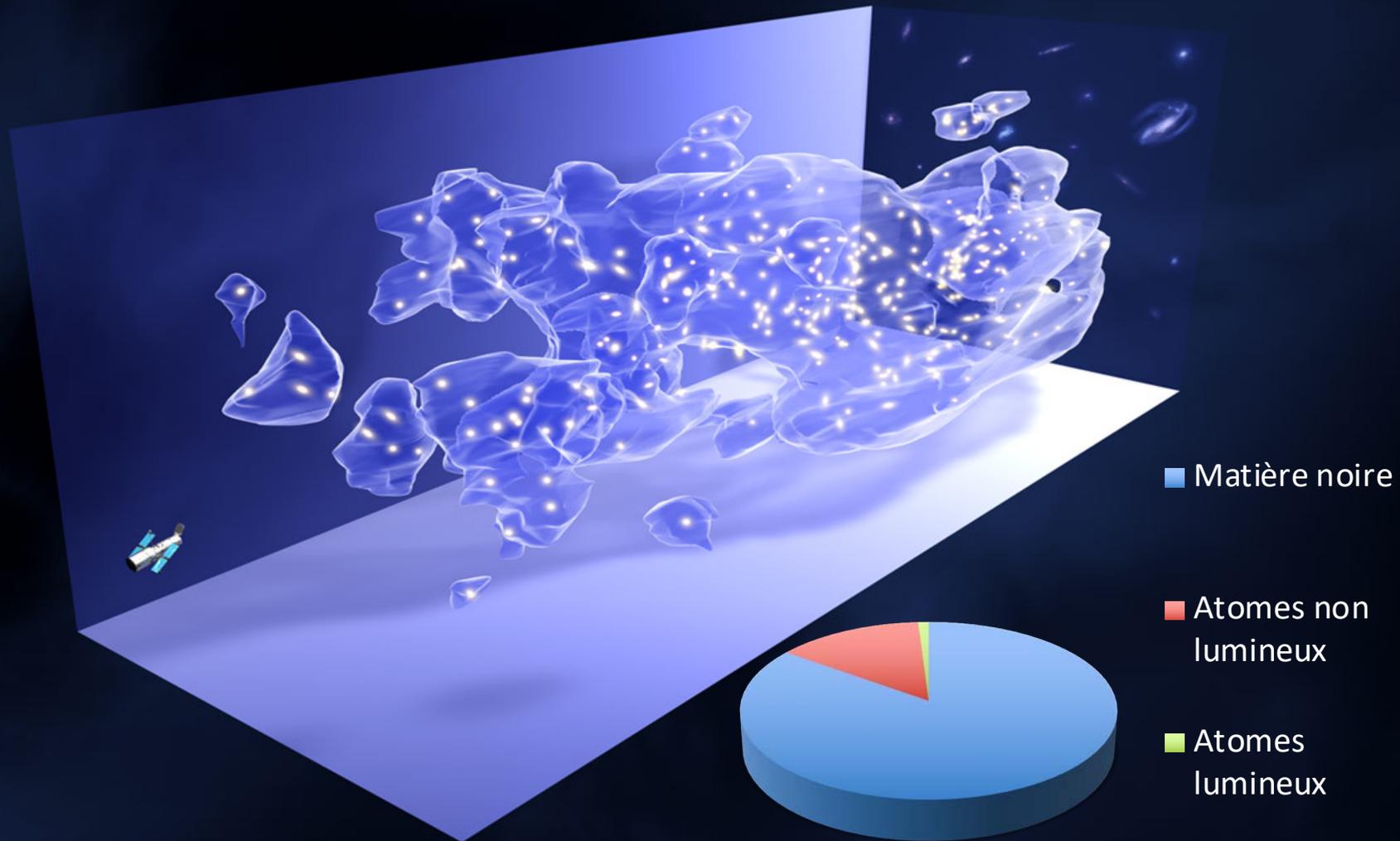
ensemble de galaxies avec un alignement



Tout écart à une distribution aléatoire de l'orientation des galaxies est une mesure indirecte de la présence de matière dans une certaine zone du ciel.

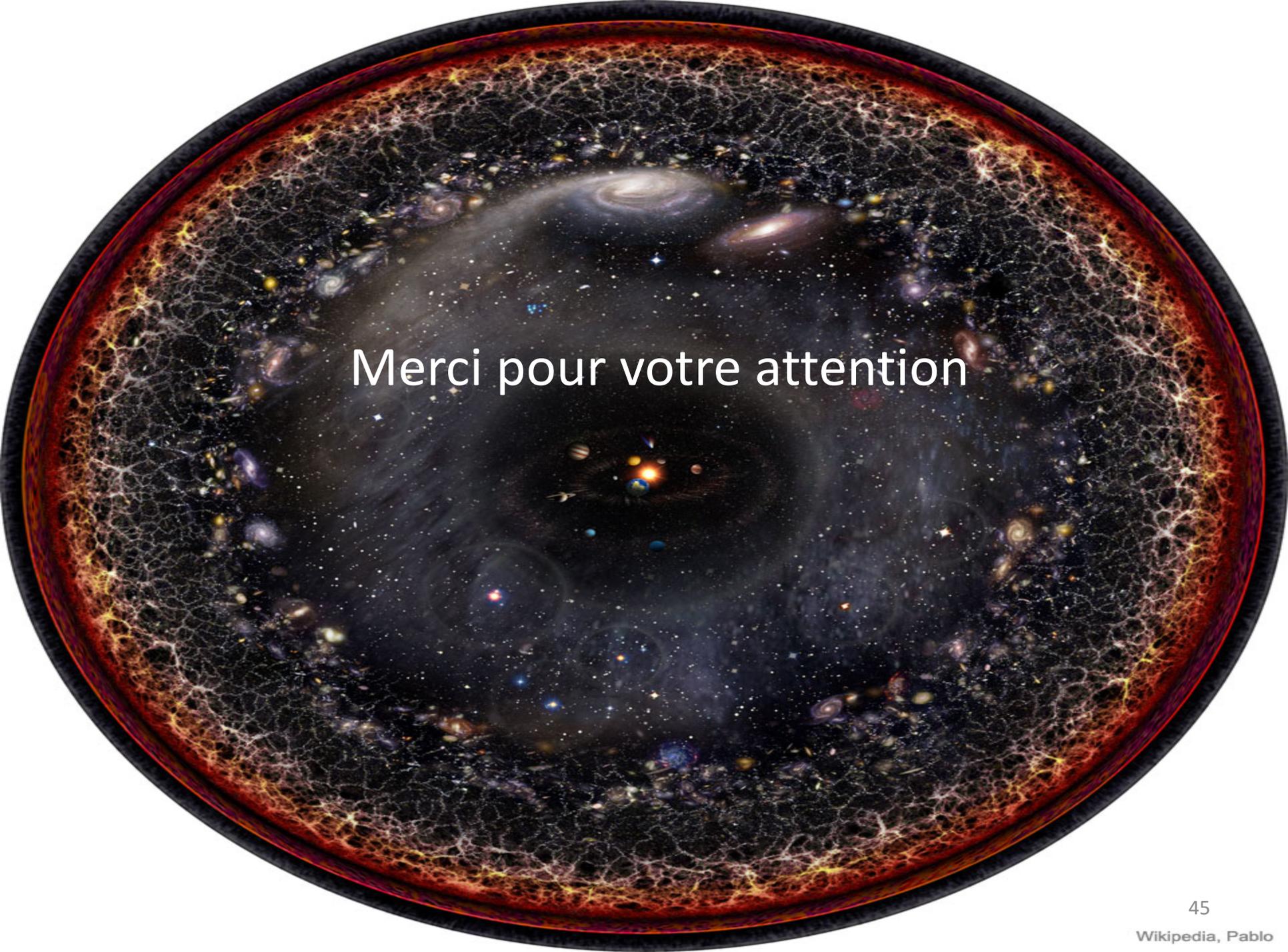


Matière dans l'Univers



Conclusions

- Sur 5 révolutions coperniciennes de la pensée humaine, 3 se sont produites pendant le dernier siècle.
- En devenant une science de précision et par son universalité, la cosmologie a poussé (et continue de la faire) l'avancée scientifique: du point de vue théorique, épistémologique et technologique
- La récente détection d'ondes gravitationnelles a ouvert une nouvelle ère
- Les expériences (satellites, accélérateurs, ...) se prolongent sur plusieurs dizaines d'années et se font par des grandes collaborations entre scientifiques de différentes équipes, souvent incluant des milliers de personnes
- La recherche est exigeante, passionnante et compte sur les nouvelles générations

A circular, wide-field view of the universe, showing a dense network of galaxies and dark matter filaments. The galaxies are scattered throughout the field, with some appearing as bright, colorful spots and others as faint, diffuse clouds. The dark matter filaments form a complex, web-like structure that fills the space. The overall appearance is that of a vast, interconnected cosmic web. The text "Merci pour votre attention" is centered over the image in a white, sans-serif font.

Merci pour votre attention