

# 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  $\approx 1 \text{ pc} \approx 3 \text{ al} \approx 10^{16} \text{ m}$

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

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

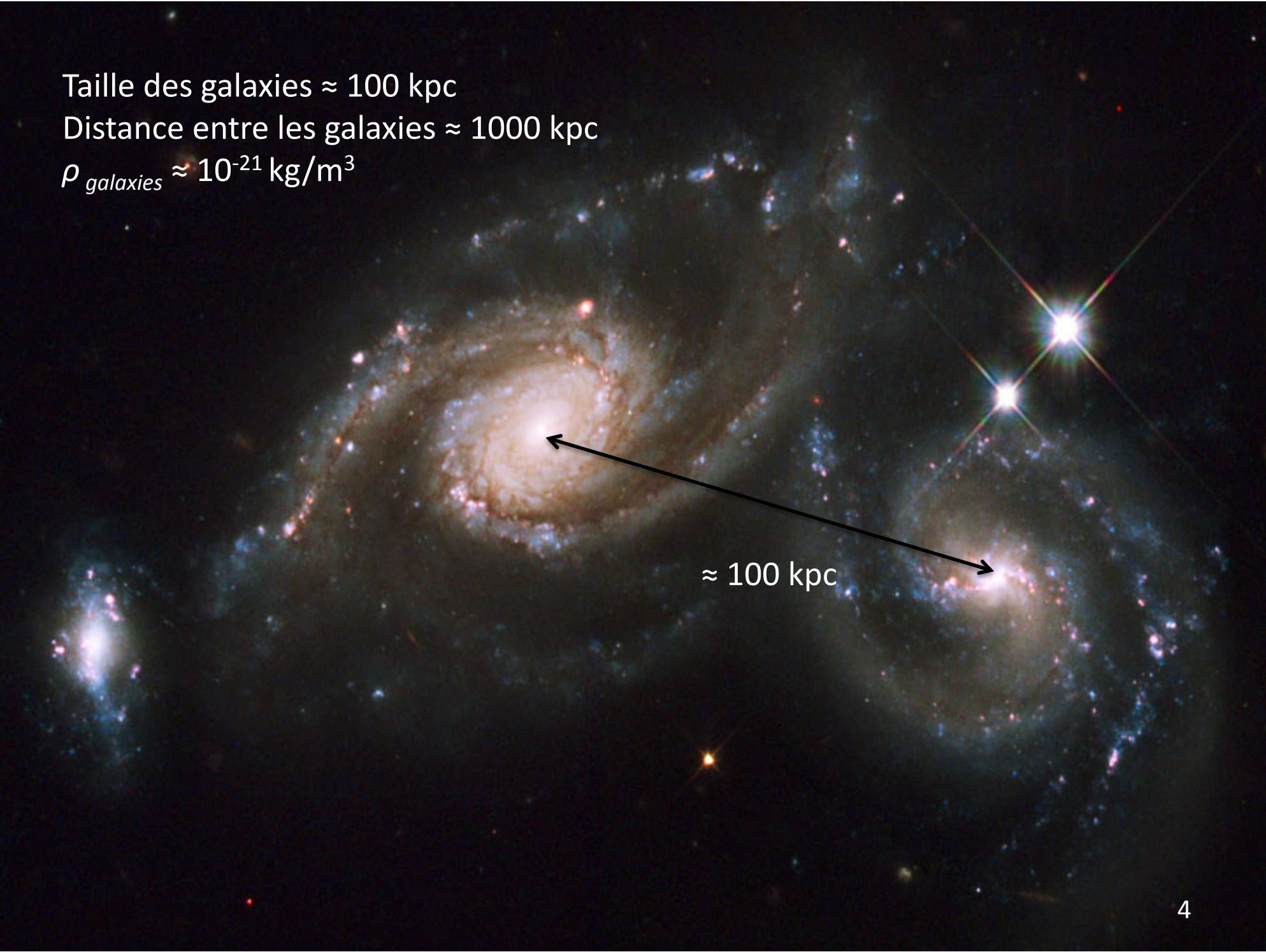
A black double-headed arrow is positioned horizontally, pointing towards two bright blue stars. The arrow is centered under the text " $\approx 1 \text{ pc} \approx 3 \text{ al}$ ".



Taille des galaxies  $\approx 100$  kpc

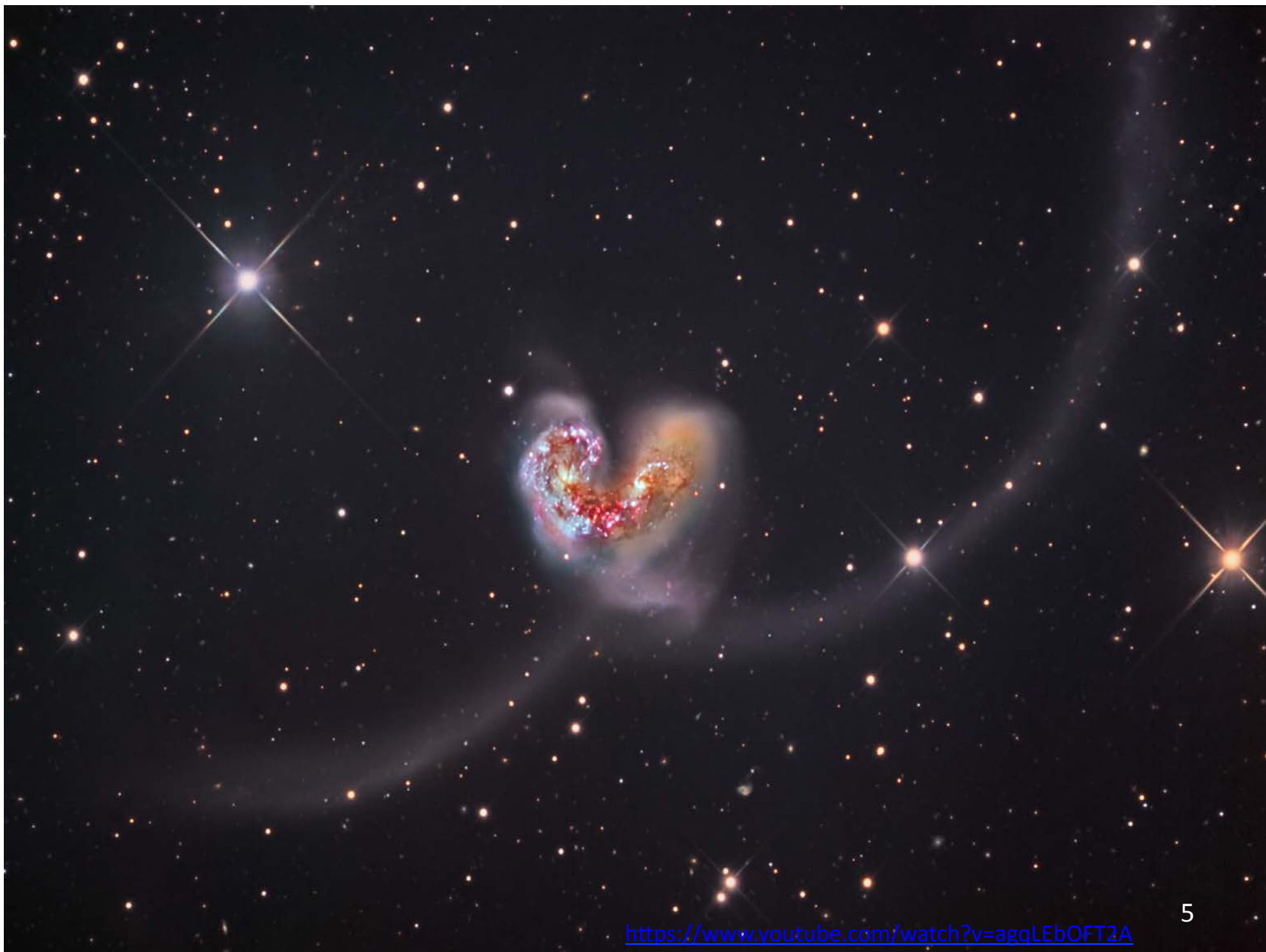
Distance entre les galaxies  $\approx 1000$  kpc

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



$\approx 100$  kpc







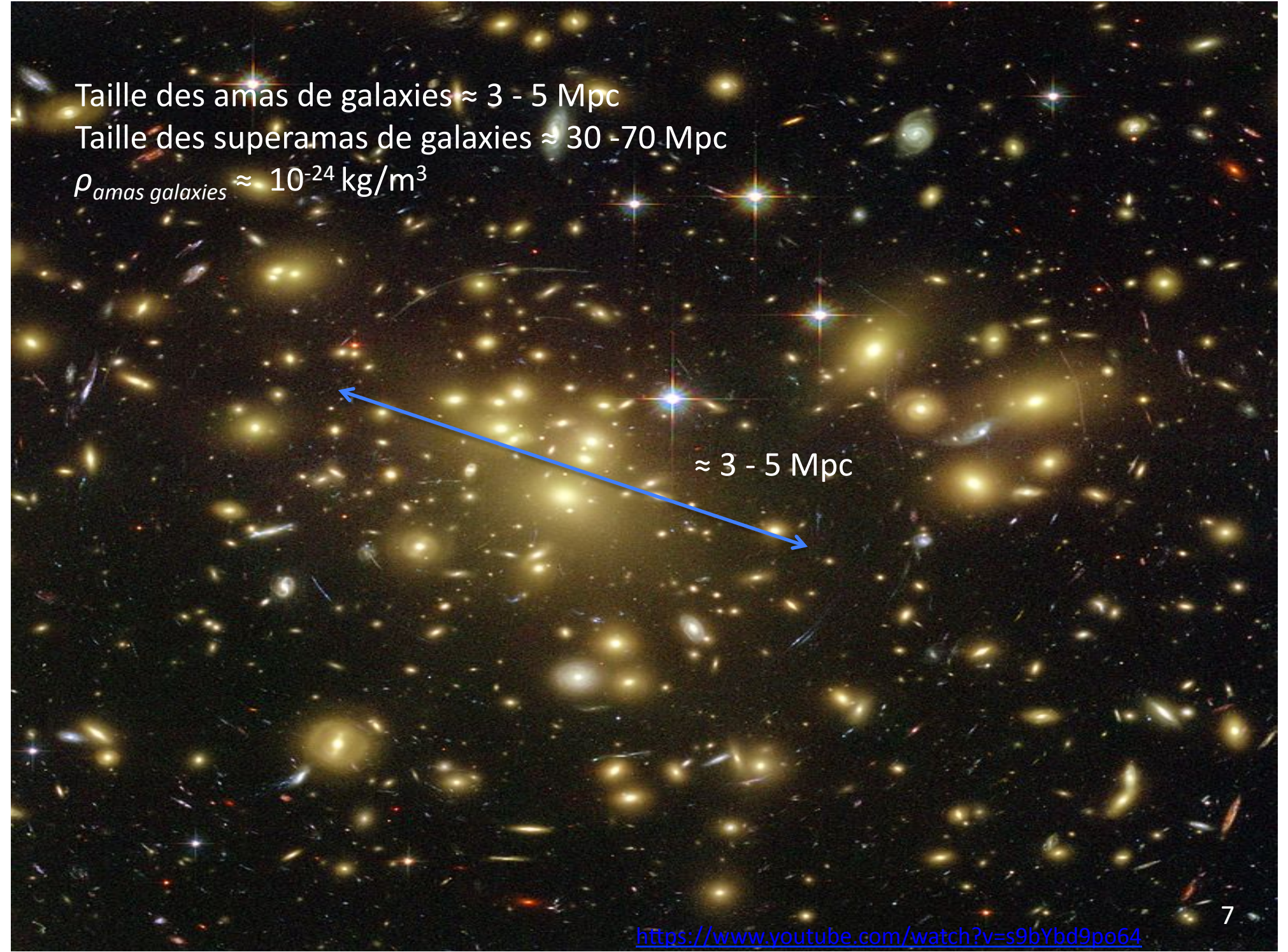




Taille des amas de galaxies  $\approx 3 - 5$  Mpc

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

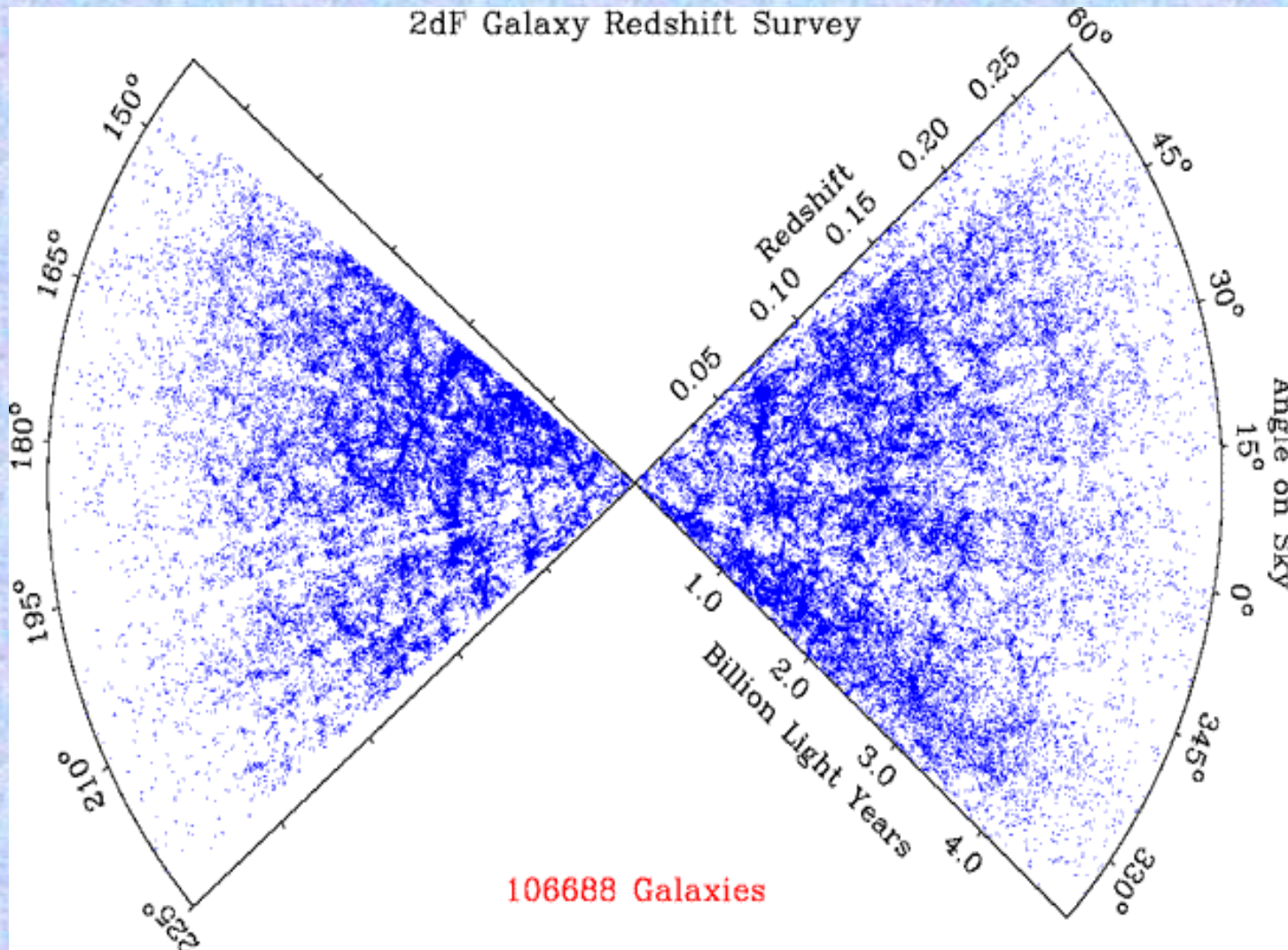
$\rho_{amas\ galaxies} \approx 10^{-24} \text{ kg/m}^3$



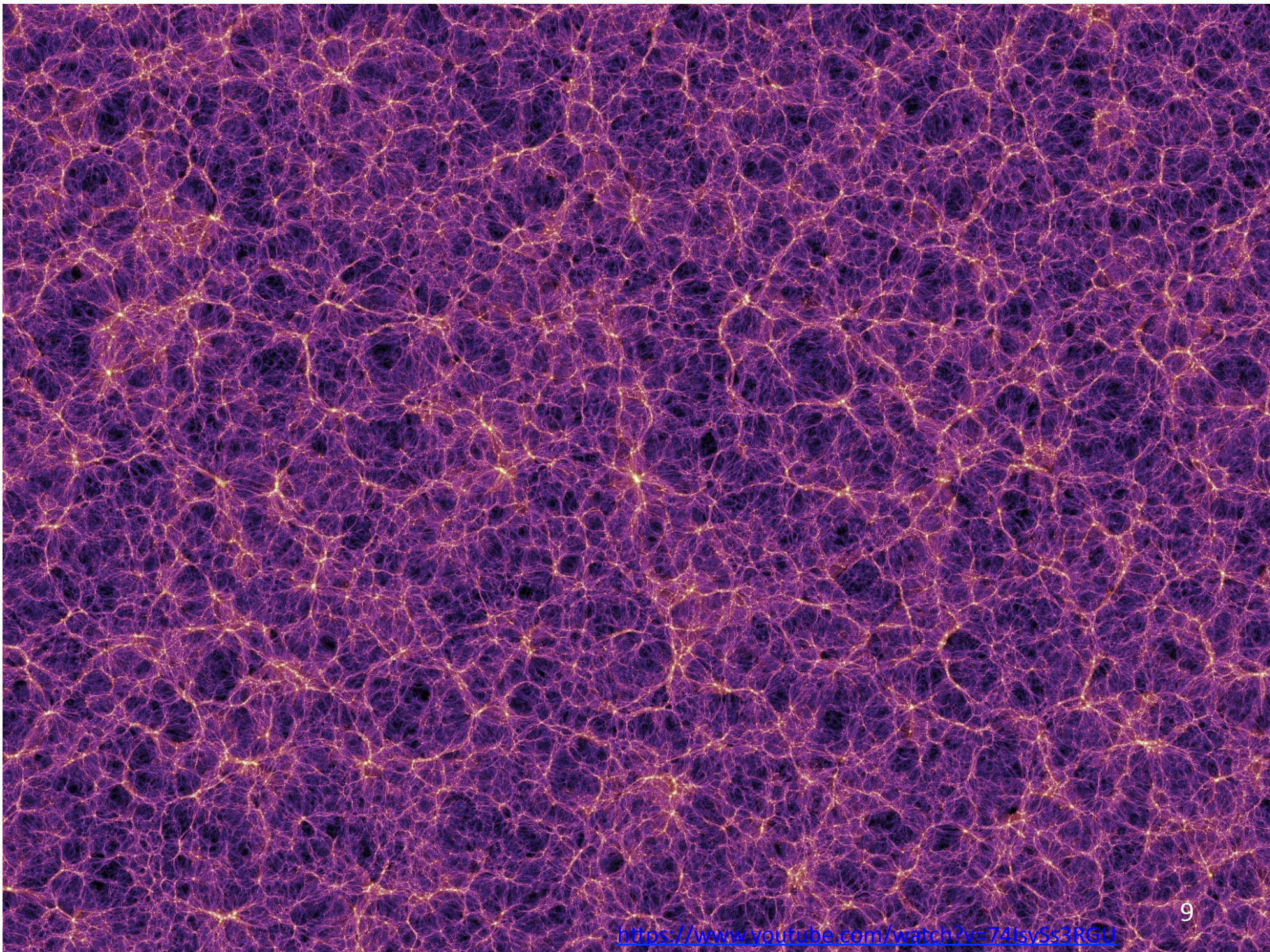
$\approx 3 - 5$  Mpc



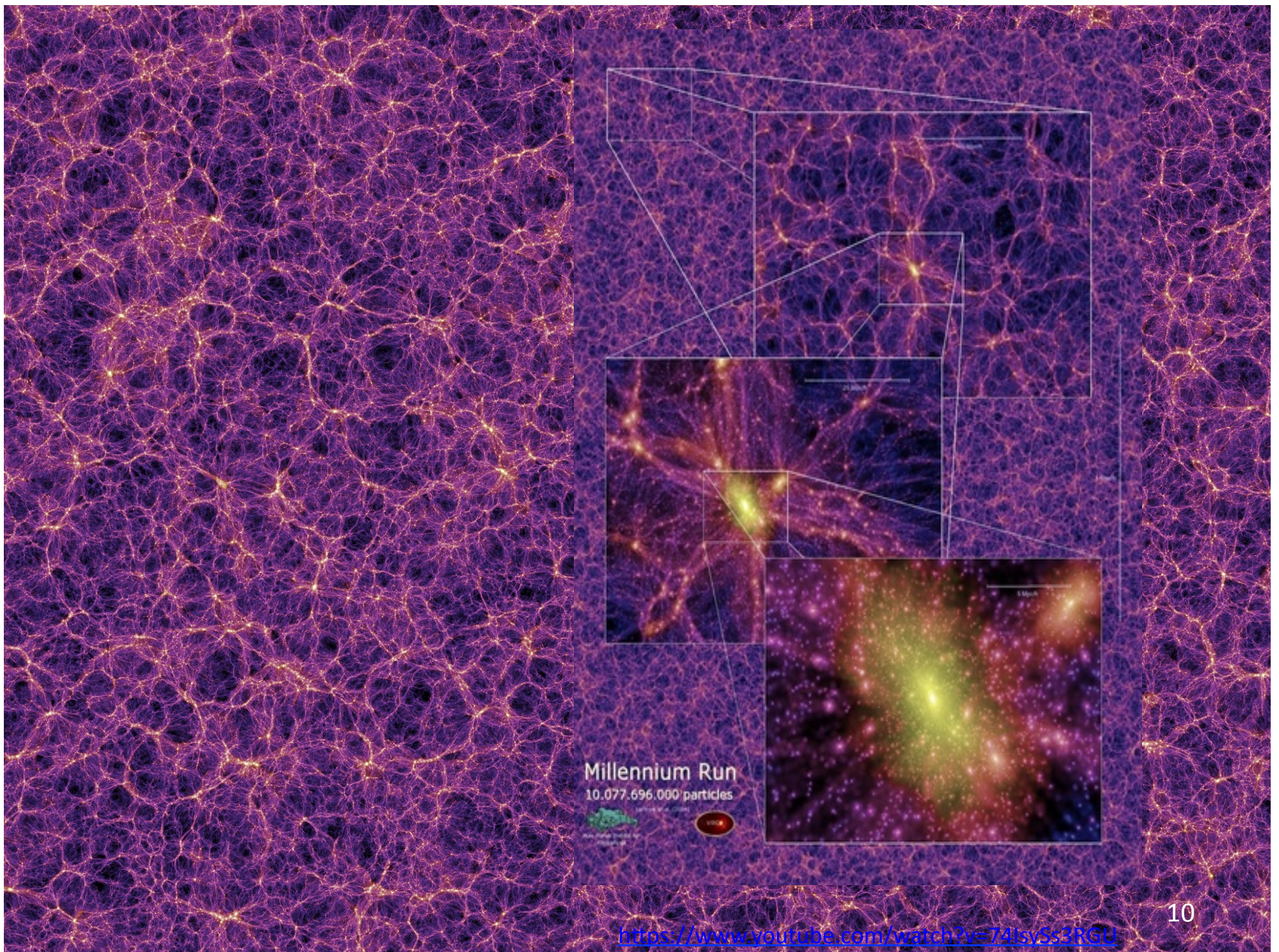
À des échelles dépassant le Gpc on retrouve une structure en « maille de filet »,  
bien reproduite par les simulations  $\rho_{univers} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \approx \rho_{critique}$







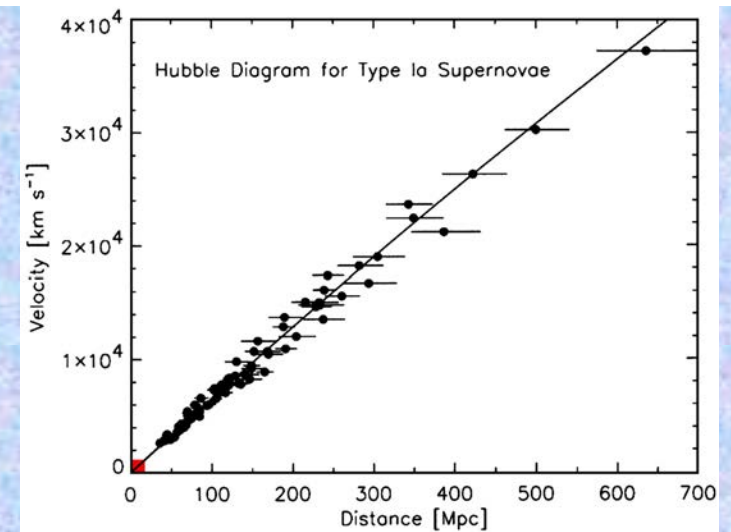






## L'univers est en expansion

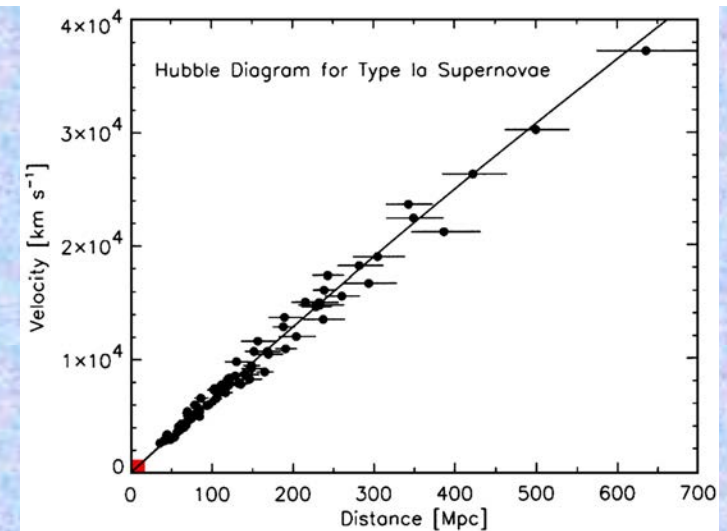
- Observation des premières galaxies par E. Hubble (1924)





## L'univers est en expansion

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

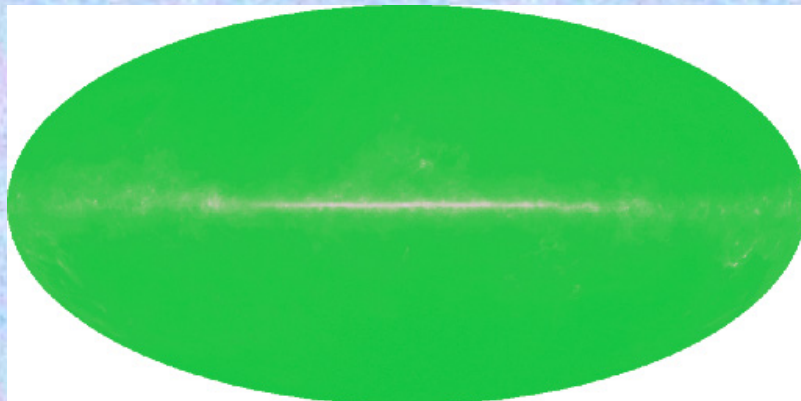


## L'univers est passé par une phase très chaude (Big Bang)

- Détection du fond diffus cosmologique (CMB)

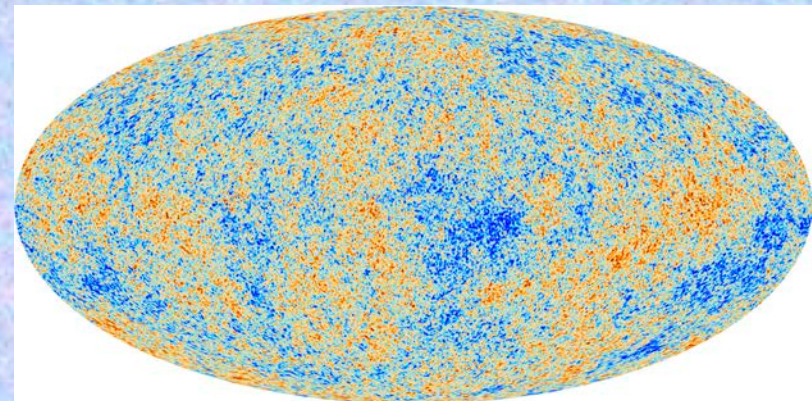
parfaitement homogène et isotrope:  $T = 2,7 \text{ °K}$   
(Penzias et Wilson, 1964)

COBE



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

Planck

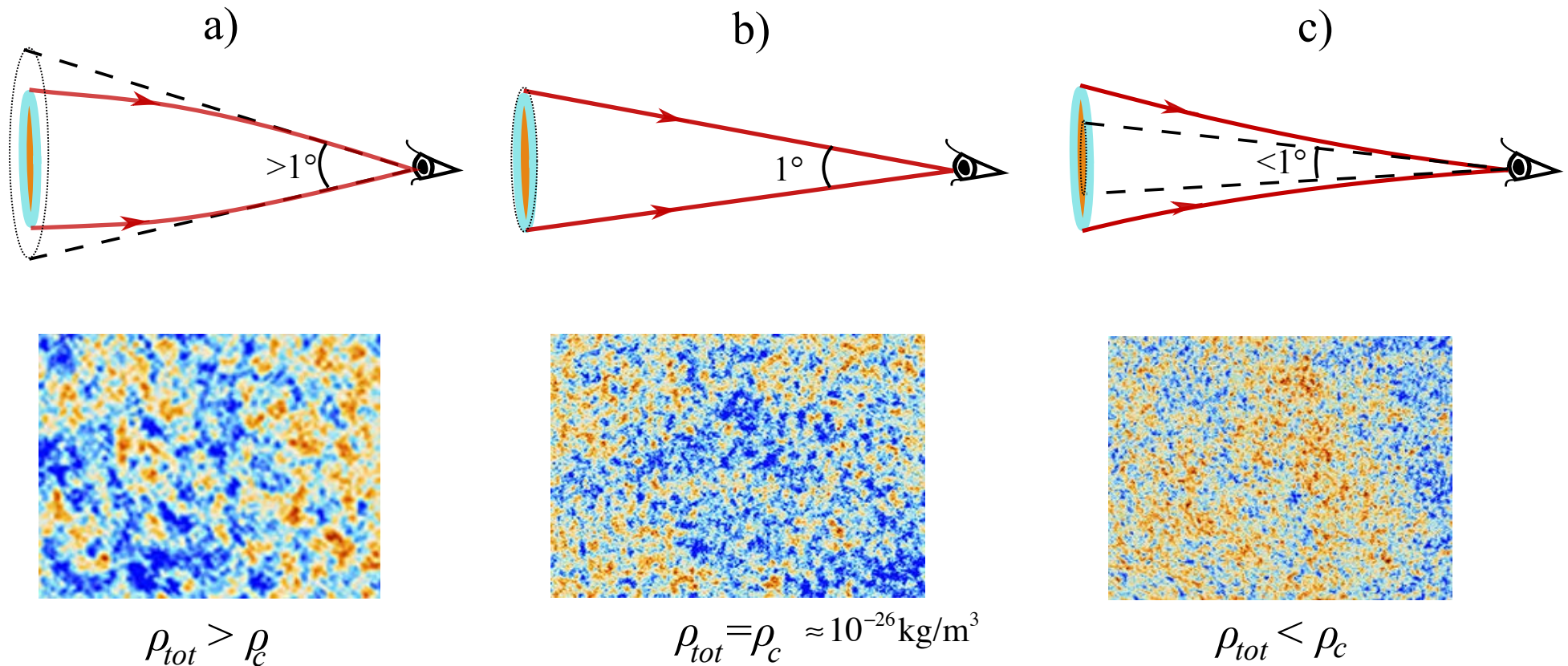


- Abondances d'Hélium dans l'univers (Steigman, 2006)



L'univers est plat (précision de 0,01%, Planck 2015)

L'analyse statistique des fluctuations du CMB nous donne des informations sur la courbure de l'univers, donc sa densité totale





## 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<sup>ème</sup> révolution copernicienne)
- En expansion (3<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> révolution copernicienne)
- En expansion (3<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> révolution copernicienne)

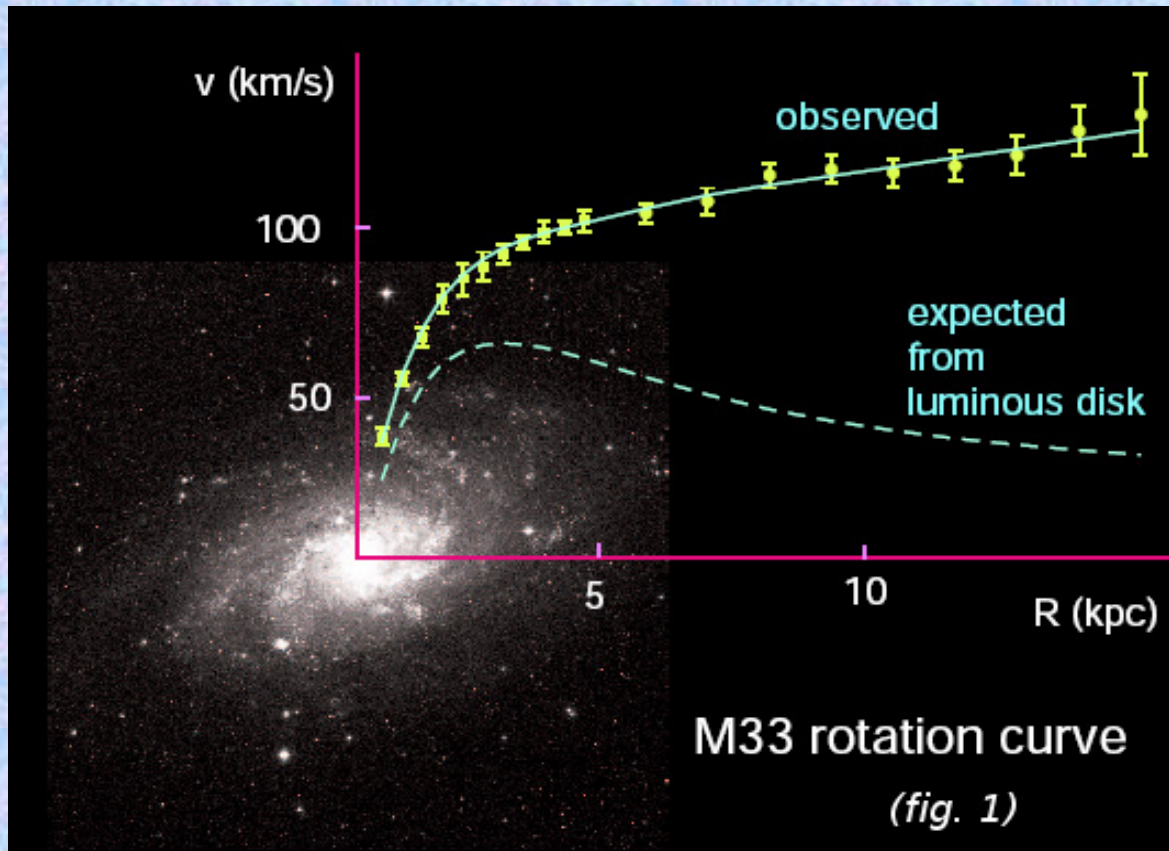


## Indices de la présence de « matière noire »

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

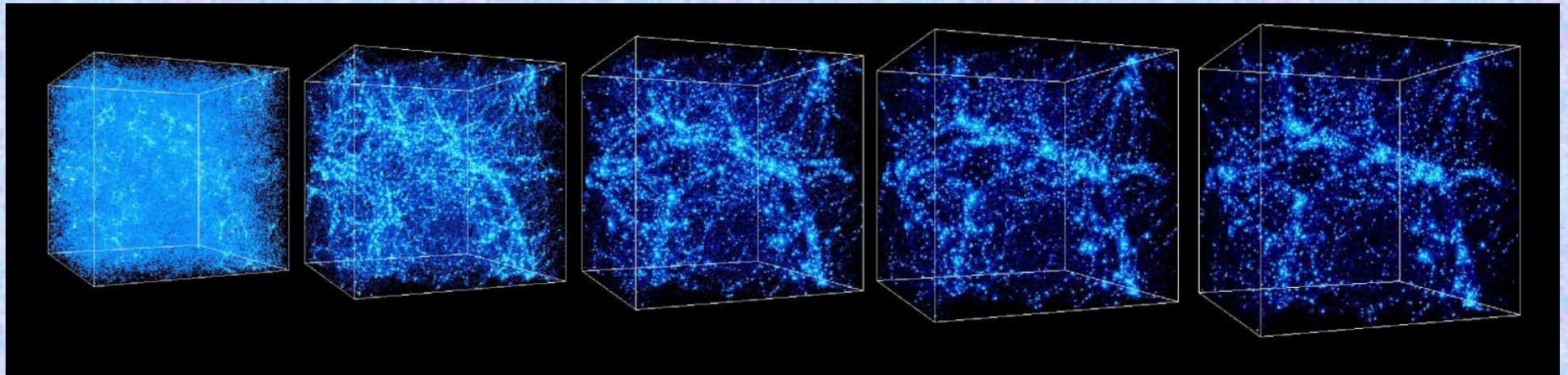
$$\frac{GM(R)}{R^2} = \frac{v^2(R)}{R}$$

$$\Rightarrow v(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}} \propto \sqrt{\frac{1}{R}}$$



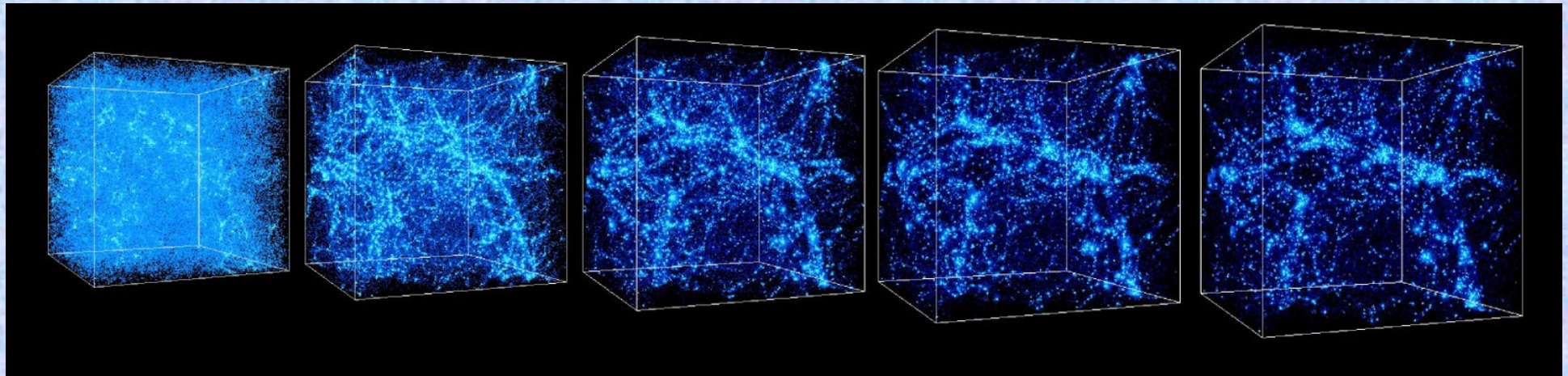


3. Formation des structures: si on ne tient pas compte du 85% de matière noire constituant la masse de l'univers, les simulations ne reproduisent pas la structure à observée large échelle (Millenium, 2013).

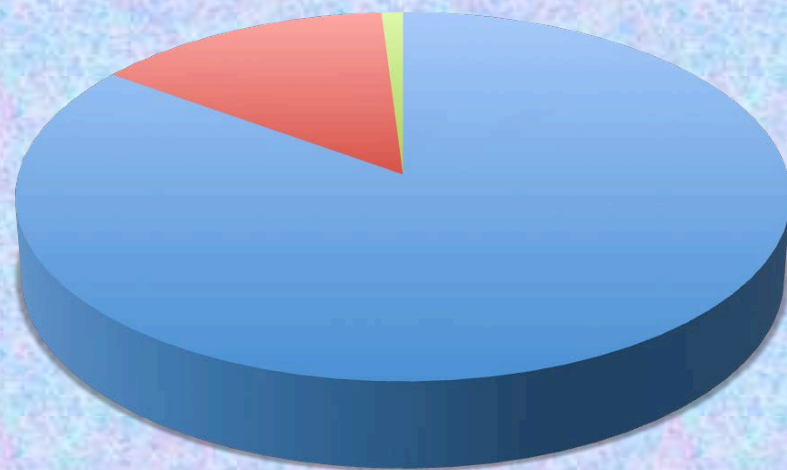




3. Formation des structures: si on ne tient pas compte du 85% de matière noire constituant la masse de l'univers, les simulations ne reproduisent pas la structure à observée large échelle (Millenium, 2013).



## Matière dans l'Univers



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

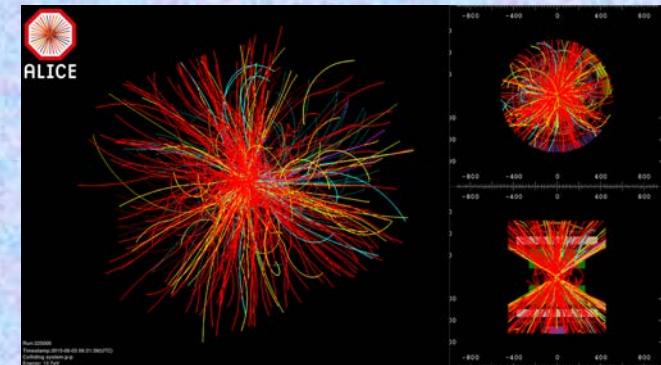


# La Matière Noire n'interagit pas électromagnétiquement

- 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



Il nous manque encore un facteur de l'ordre  $10^1$  pour arriver à  $10^{-26} \text{ kg/m}^3$ !

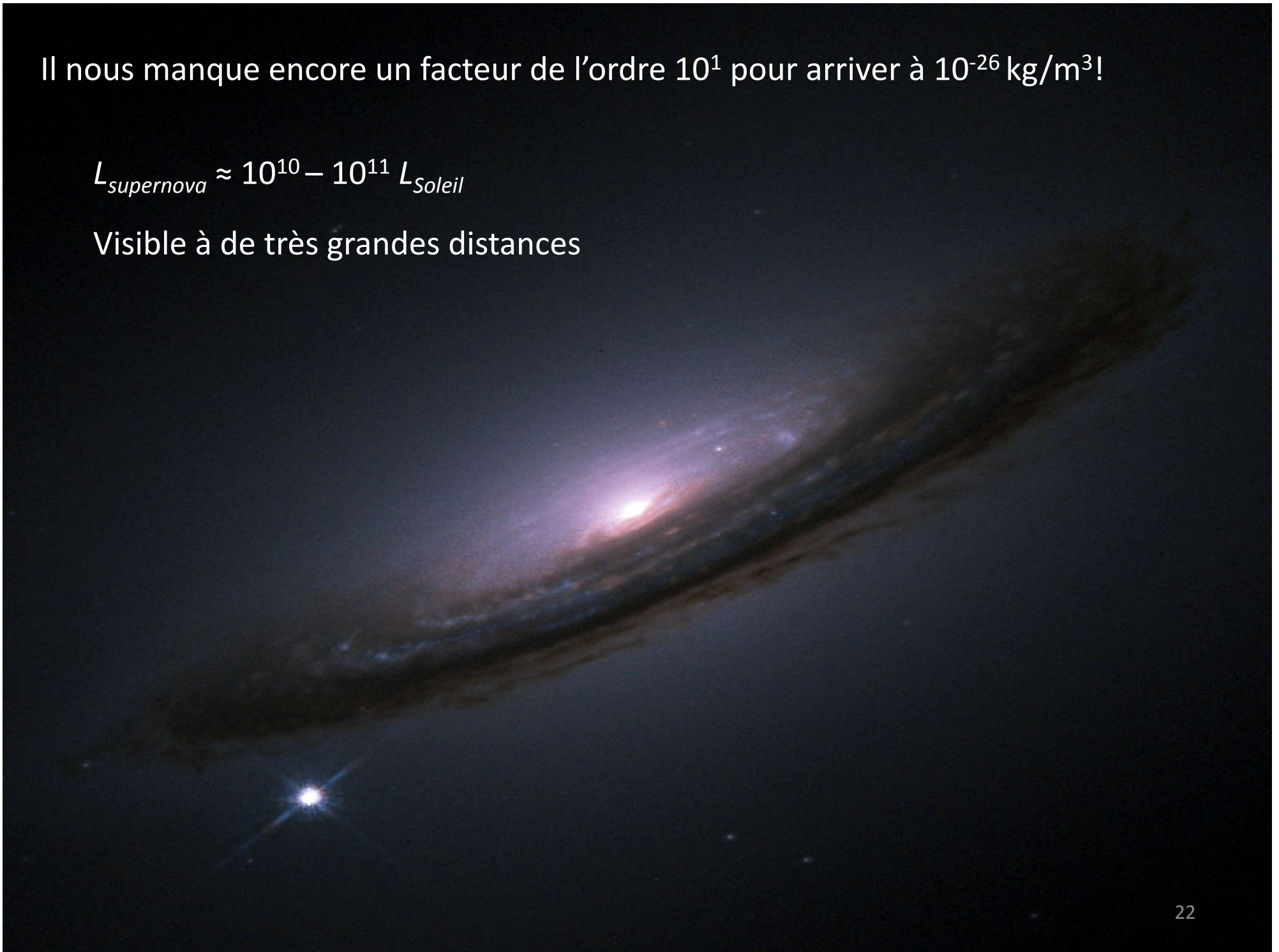




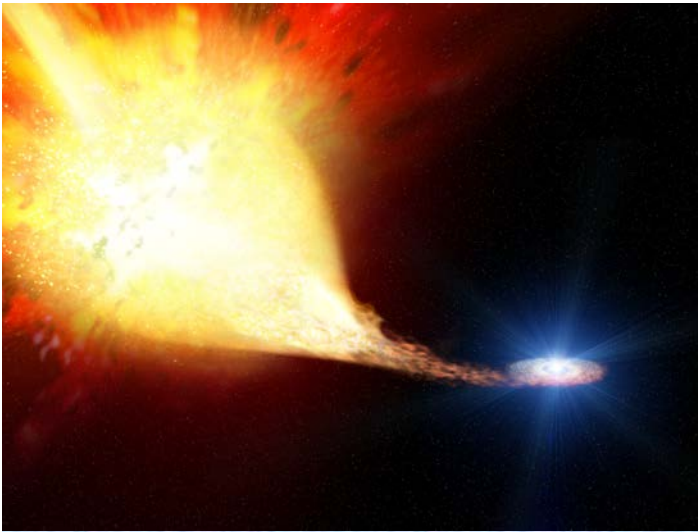
Il nous manque encore un facteur de l'ordre  $10^1$  pour arriver à  $10^{-26} \text{ kg/m}^3$ !

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

Visible à de très grandes distances



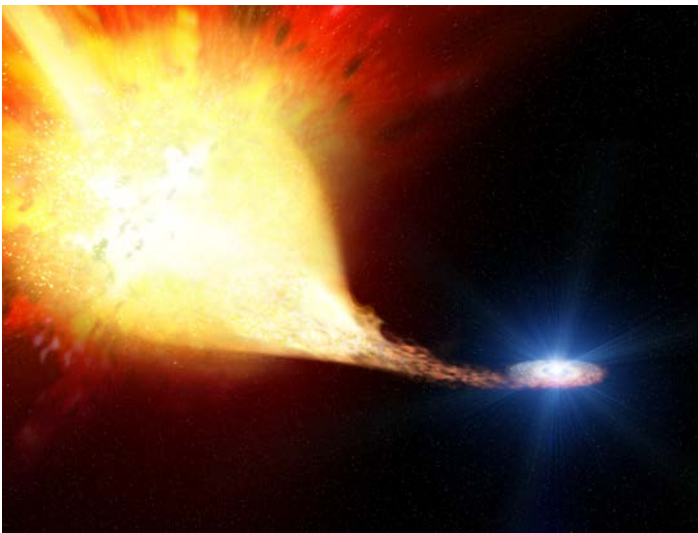




Sn 1a: la luminosité  $L$  [W] est connue car liée à la durée de l'explosion

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

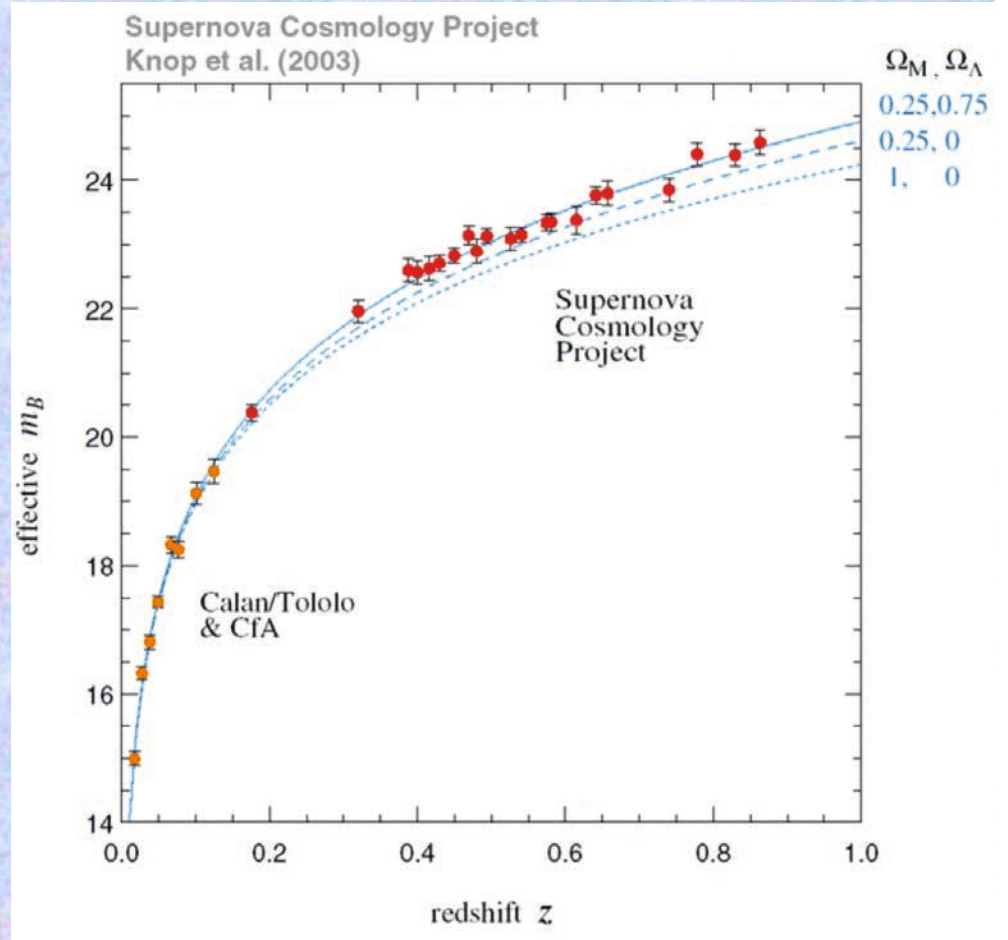




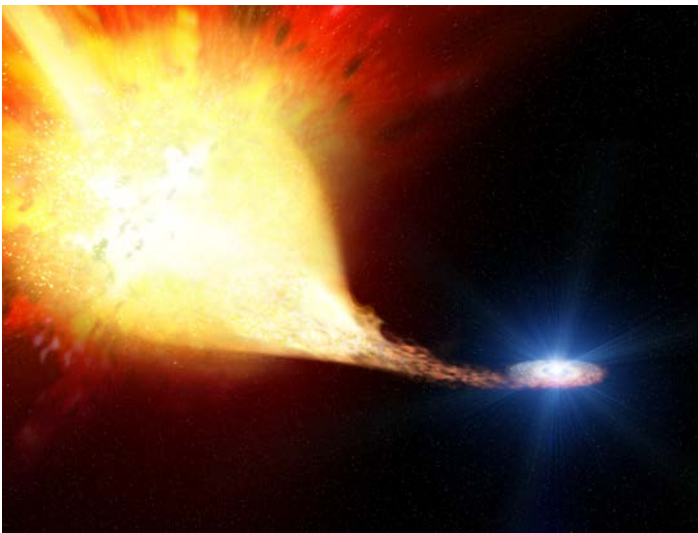
Sn 1a: la luminosité  $L$  [W] est connue car liée à la durée de l'explosion

- Mesure du flux lumineux (*magnitude*)  $f$  [W/m<sup>2</sup>]  
 $\Rightarrow$  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]



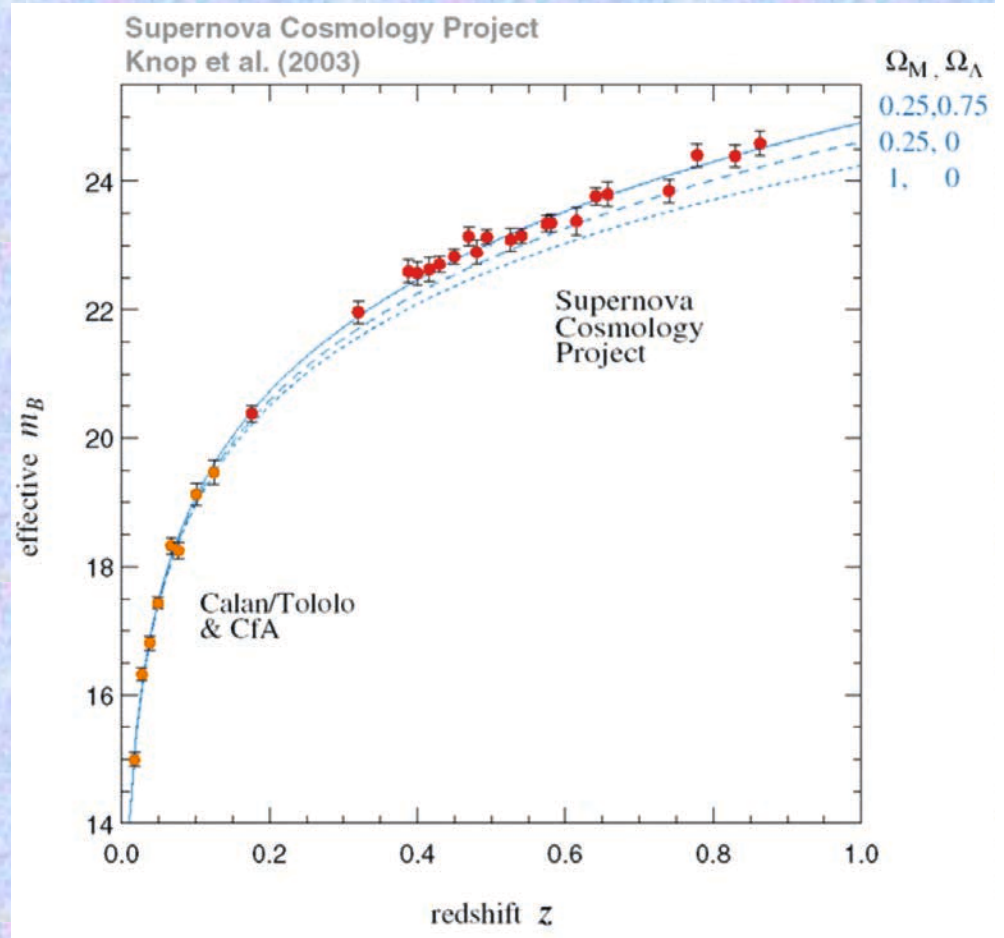
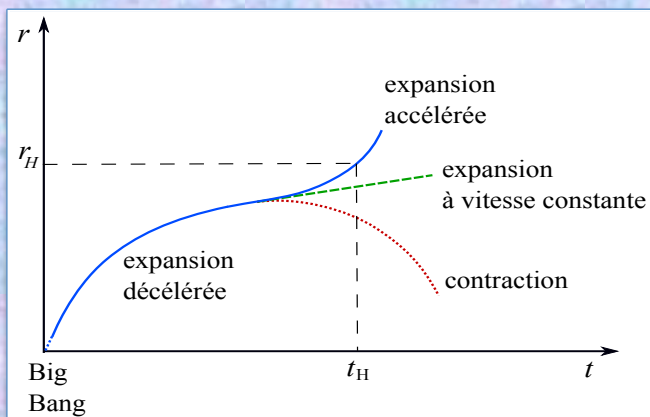




Sn 1a: la luminosité  $L$  [W] est connue car liée à la durée de l'explosion

- Mesure du flux lumineux (*magnitude*)  $f$  [W/m<sup>2</sup>]  
 $\Rightarrow$  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]



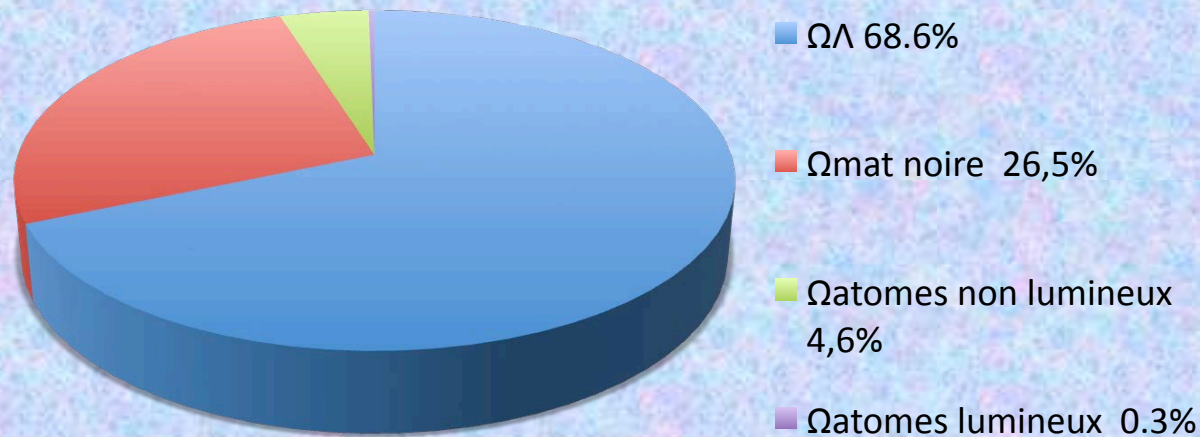
L'origine de l'énergie qui permet l'accélération de l'univers est inconnue et, pour cette raison, elle est appelée « **énergie noire** » (ou énergie « du vide »)

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

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

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

Energie totale de l'univers





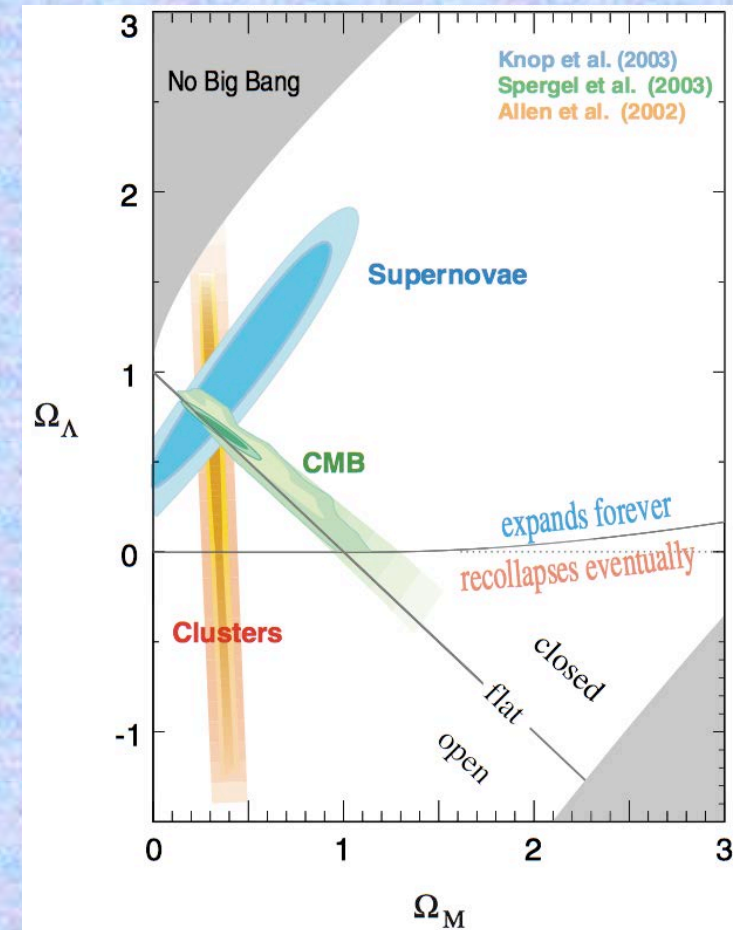
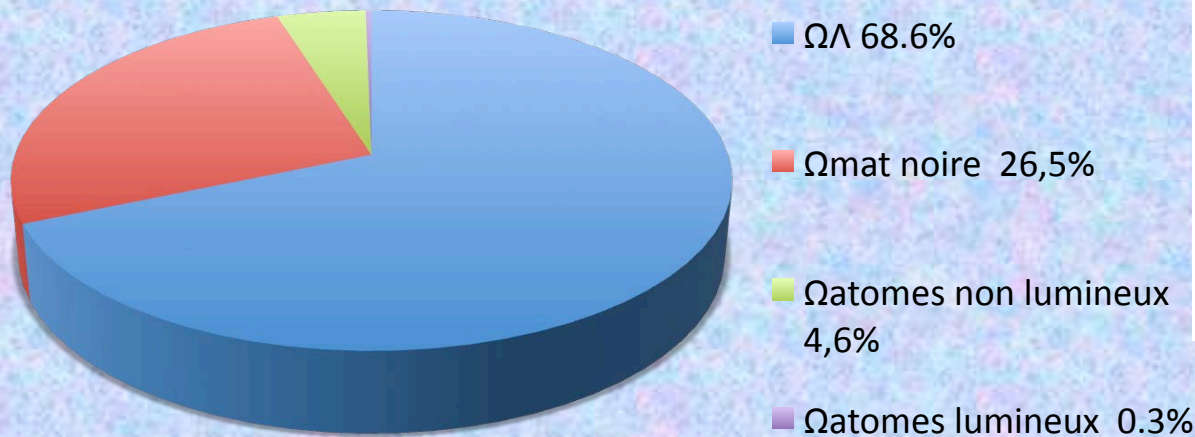
L'origine de l'énergie qui permet l'accélération de l'univers est inconnue et, pour cette raison, elle est appelée « **énergie noire** » (ou énergie « du vide »)

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

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

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

Energie totale de l'univers



## 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<sup>ème</sup> révolution copernicienne)
- En expansion (3<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> révolution copernicienne)
- En expansion accélérée (3<sup>ème</sup> + 5<sup>ème</sup> 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

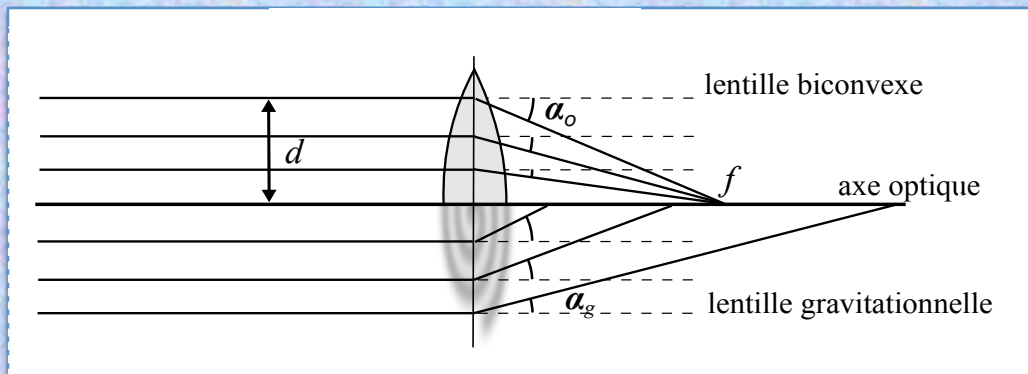
$$\rho_{lum} \approx 10^{-29} \text{ kg/m}^3$$

- ✓ 100 fois plus de **matière noire** que de matière lumineuse  $\Rightarrow \rho_{mat} \approx 10^{-27} \text{ kg/m}^3$   
(4<sup>ème</sup> révolution copernicienne)

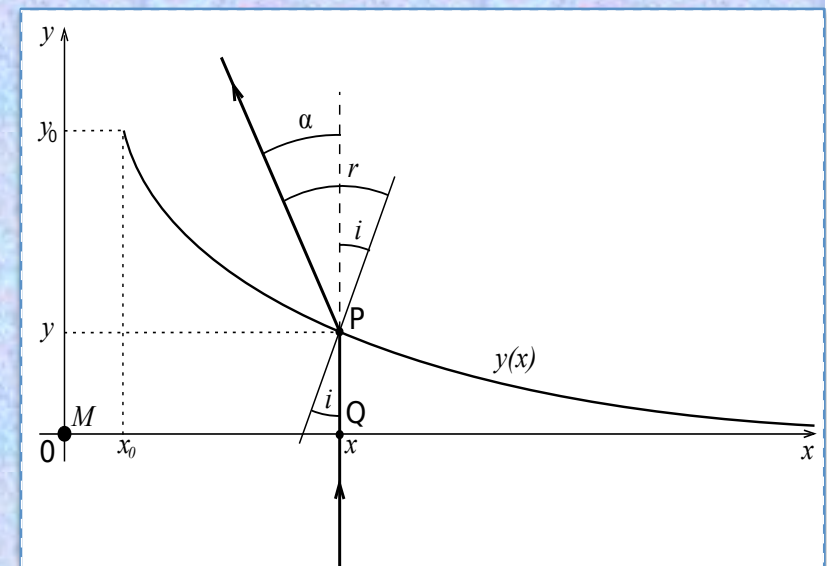
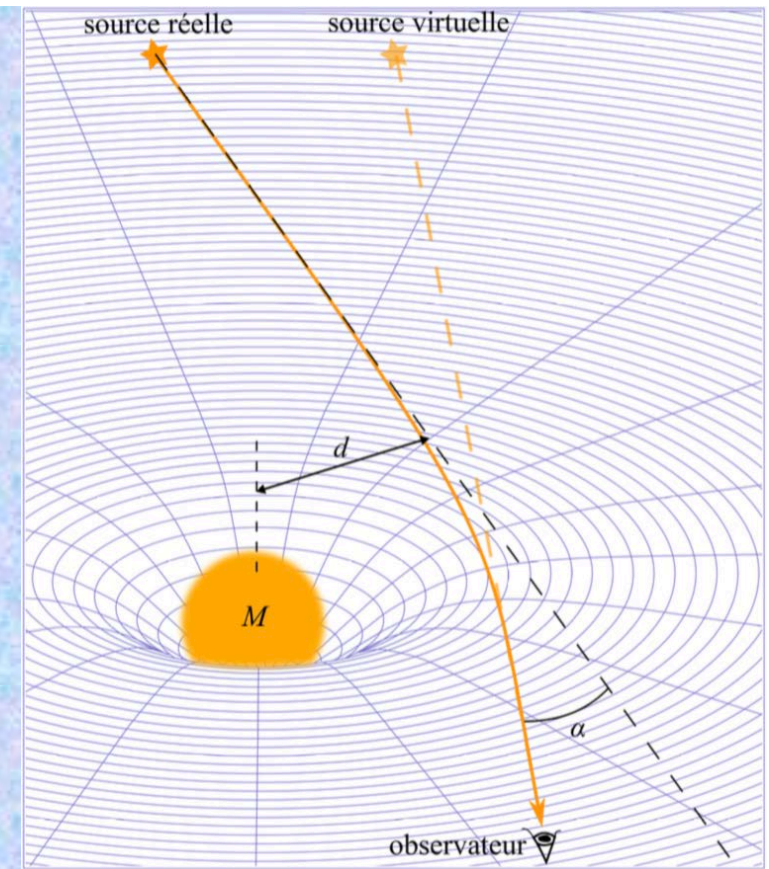
- ✓ 10 fois plus d' « **énergie noire** » que de matière  $\Rightarrow \rho_{tot} \approx 10^{-26} \text{ kg/m}^3$   
(5<sup>ème</sup> révolution copernicienne)

- 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)

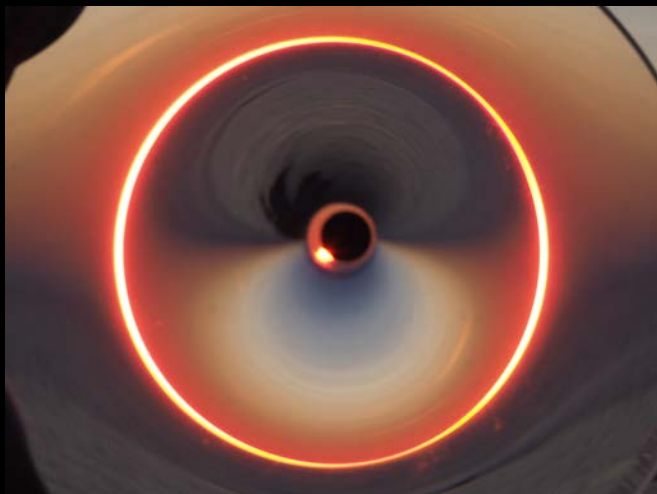
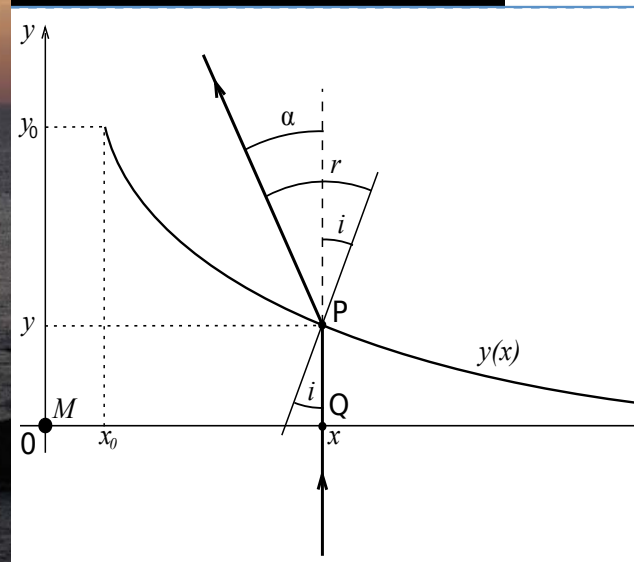
$$\alpha_g = \frac{4GM}{c^2 d} \propto \frac{1}{d}$$



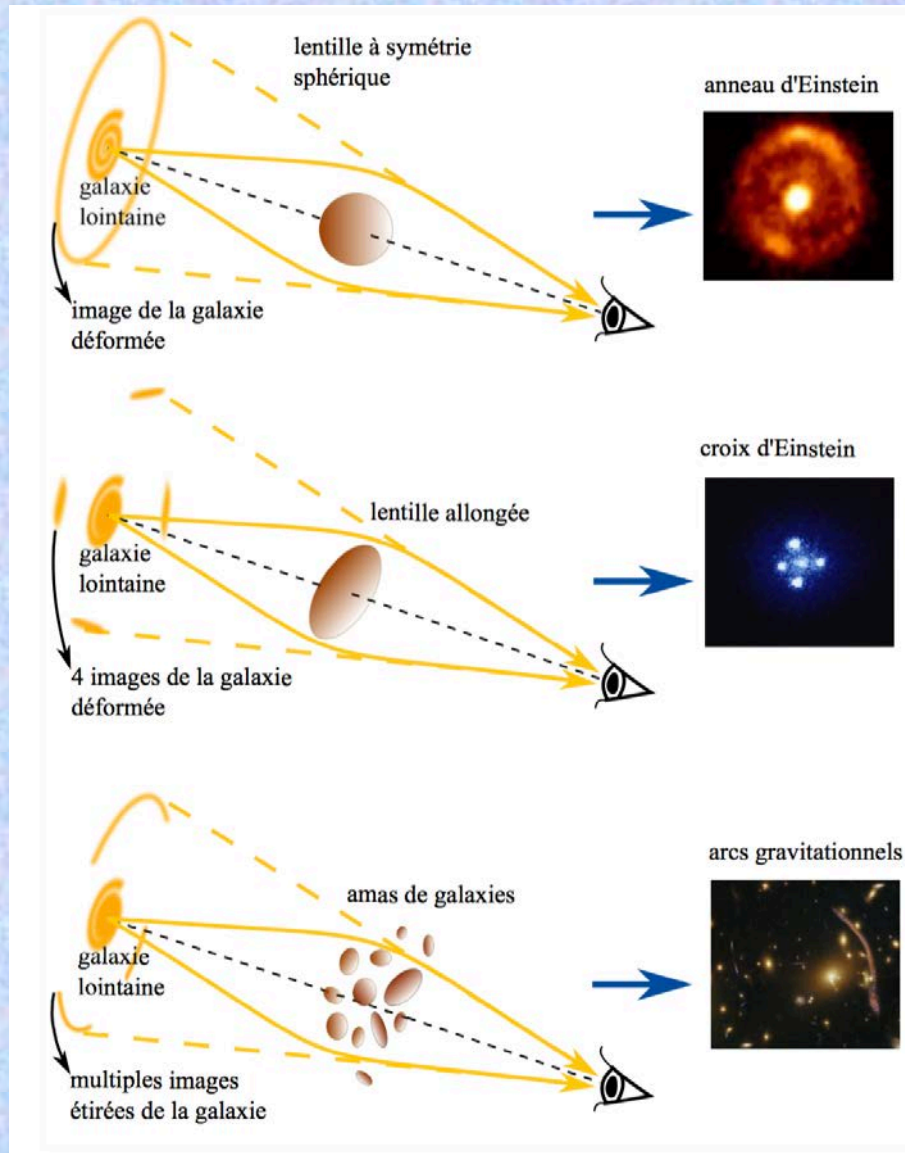
- Quelle forme devrait avoir une lentille optique pour simuler une lentille gravitationnelle?  
 $\Rightarrow$  Simple intégration donnant un profil de type  $y(x) = y_0 \ln(x)$  (S5, ex7)





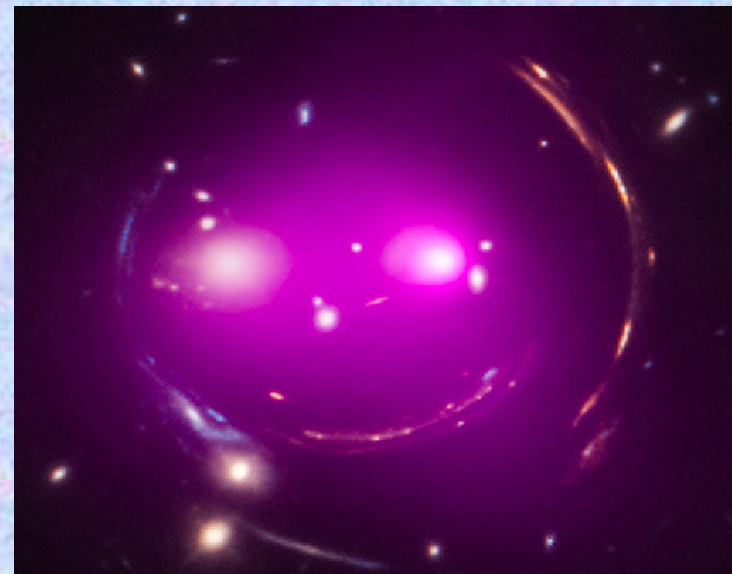
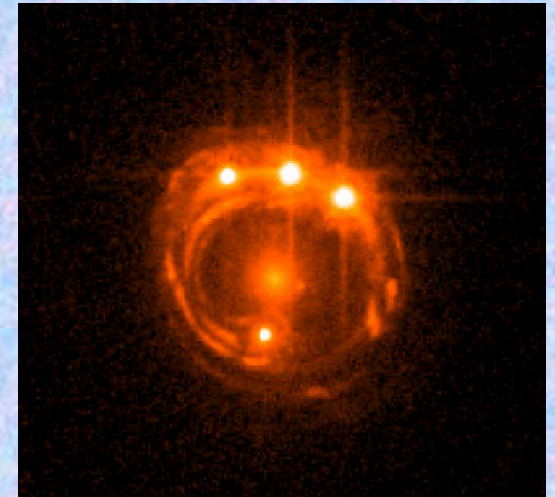


- **Strong lensing:** la lentille est constituée d'une grande concentration de masse (galaxie ou un amas de galaxies)



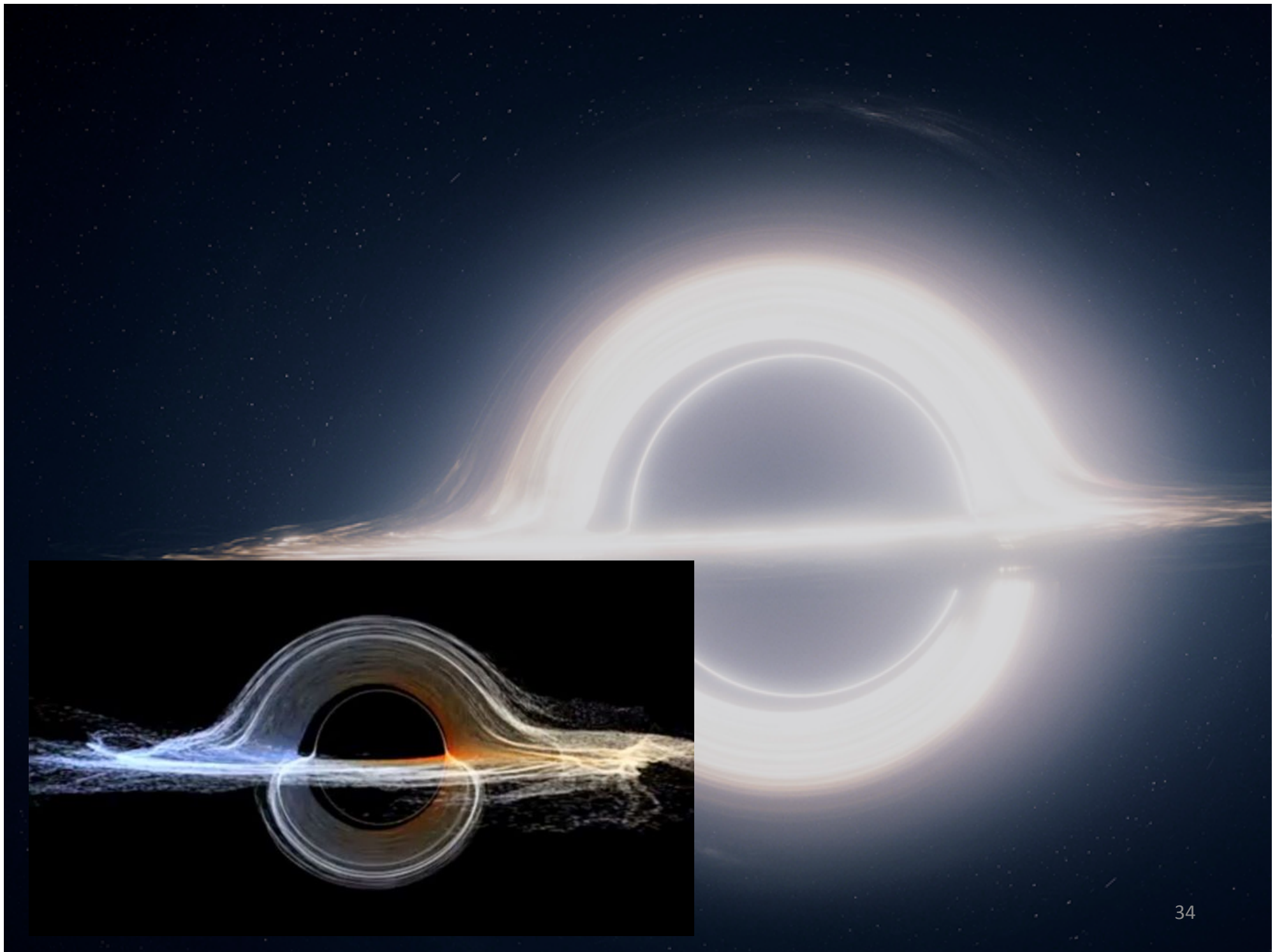
- Visibilité de galaxies lointaines (environ 10 milliards d'al)

- Reconstruction de la distribution de matière noire









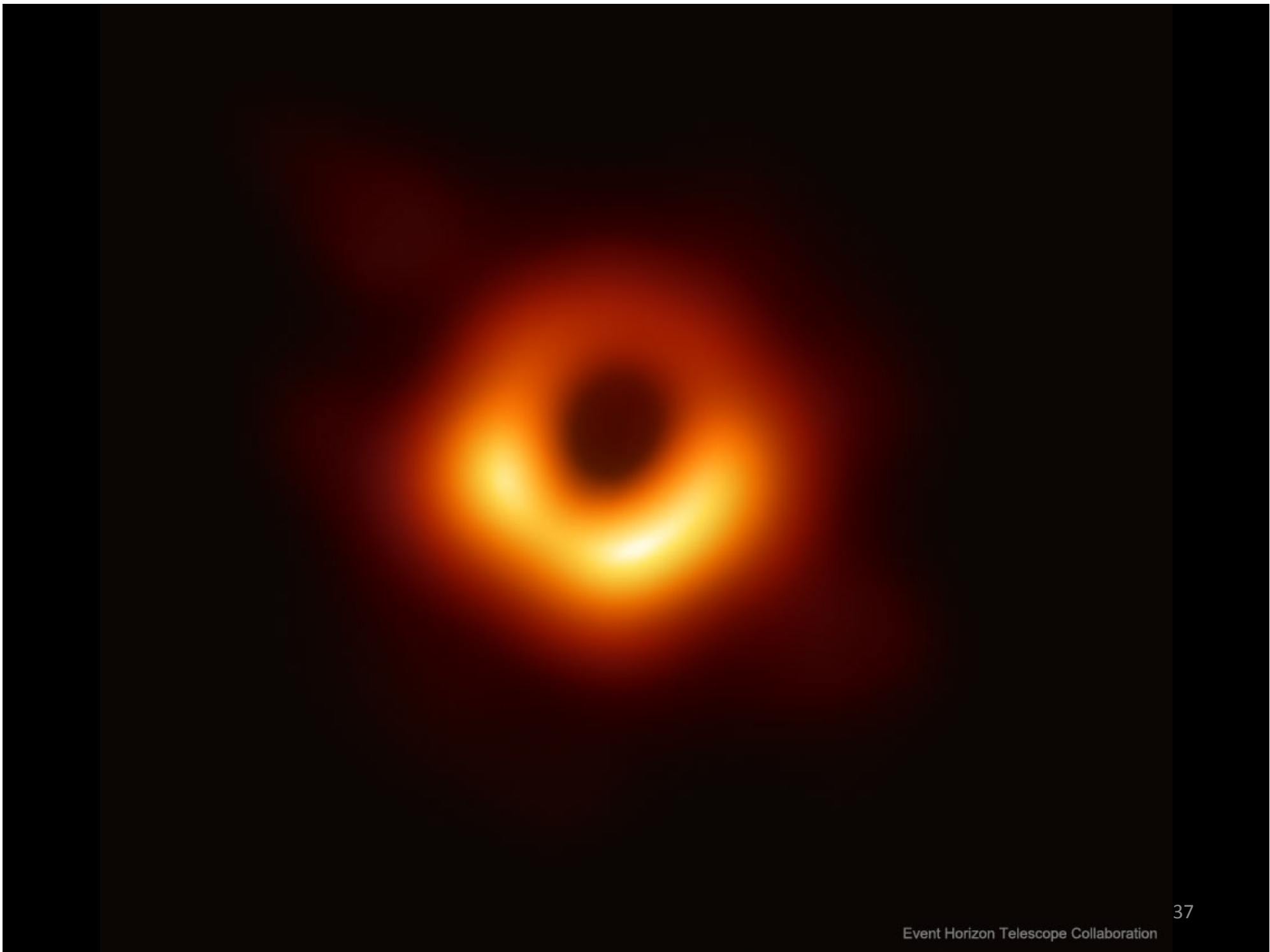


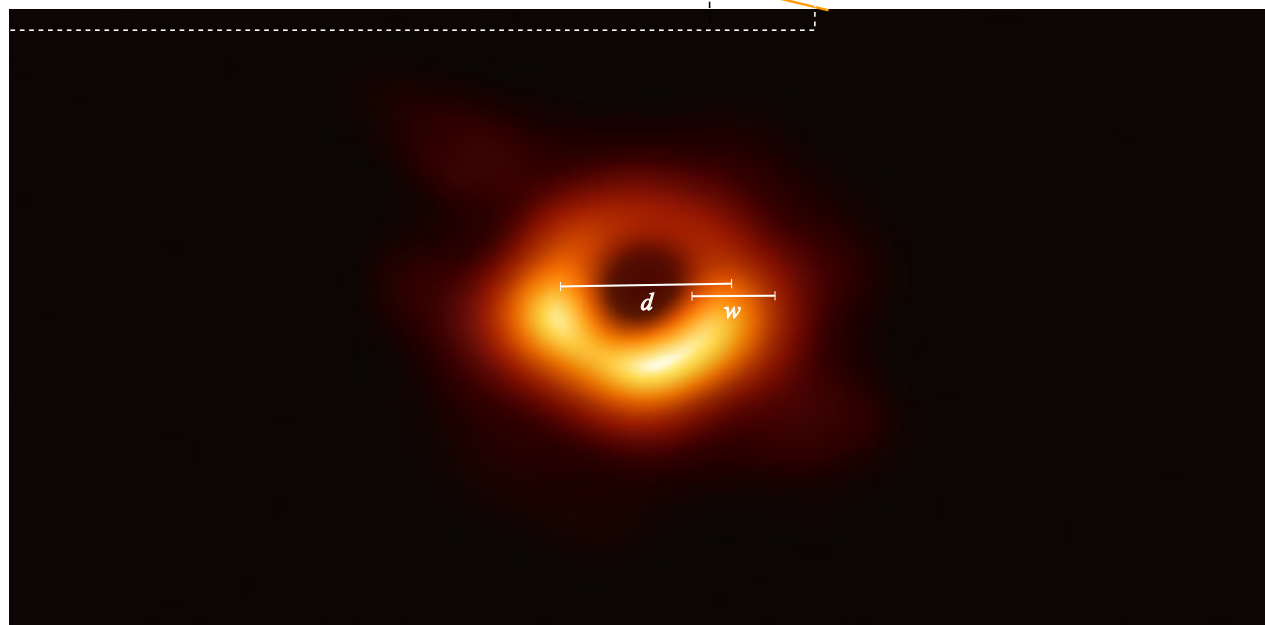
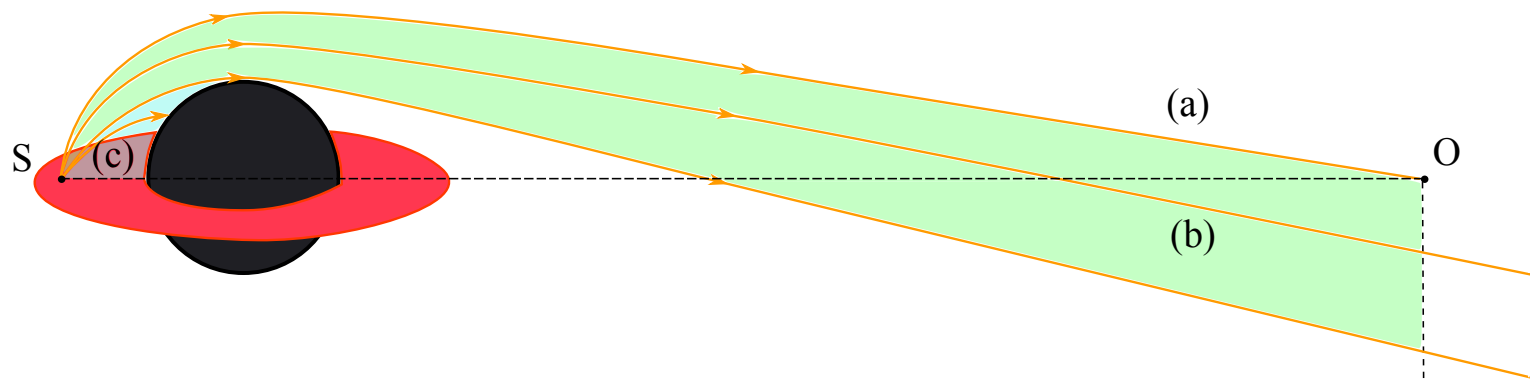
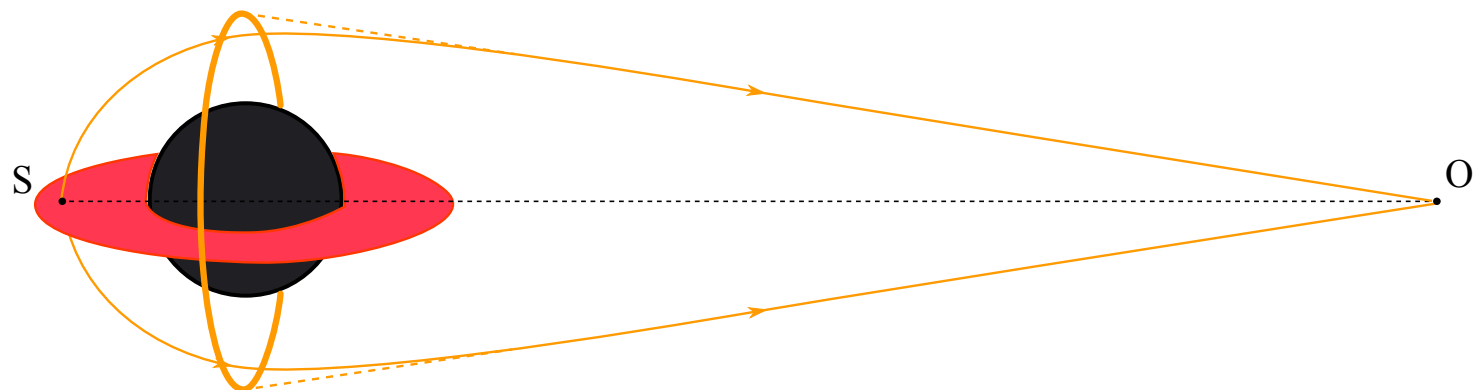




<https://arachnoid.com/relativity/index.html>

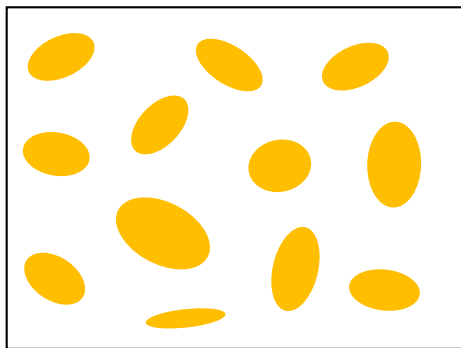




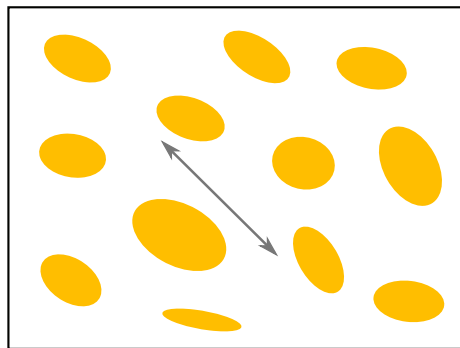




- **Weak lensing:** la matière interstellaire crée de faibles déformations ( $<1\%$ ) sur un grand nombre de galaxies, imperceptibles à l'œil humain.

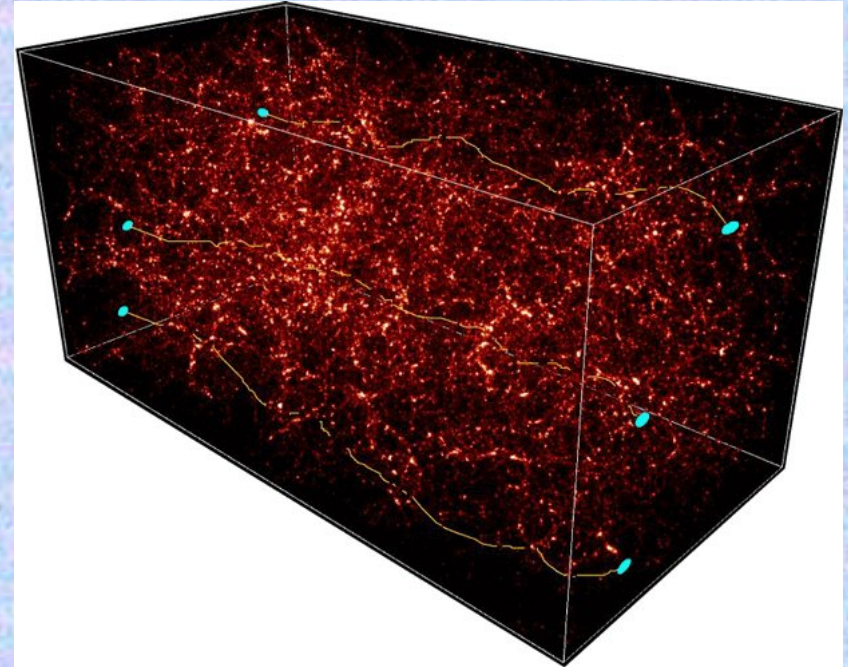


ensemble de galaxies avec  
une orientation aléatoire

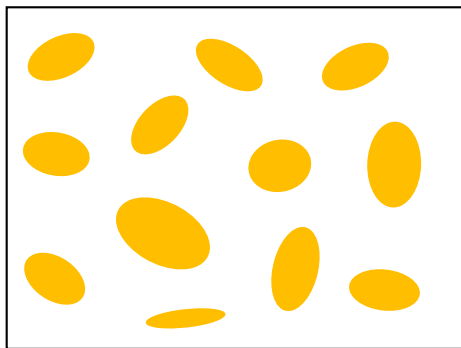


ensemble de galaxies avec  
un alignement

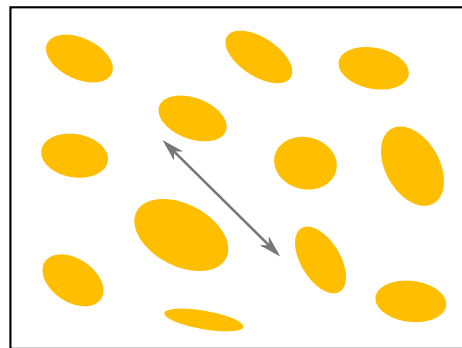
Tout écart à une distribution aléatoire de l'orientation des galaxies est une mesure indirecte de la présence de matière dans une certaine zone du ciel.



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

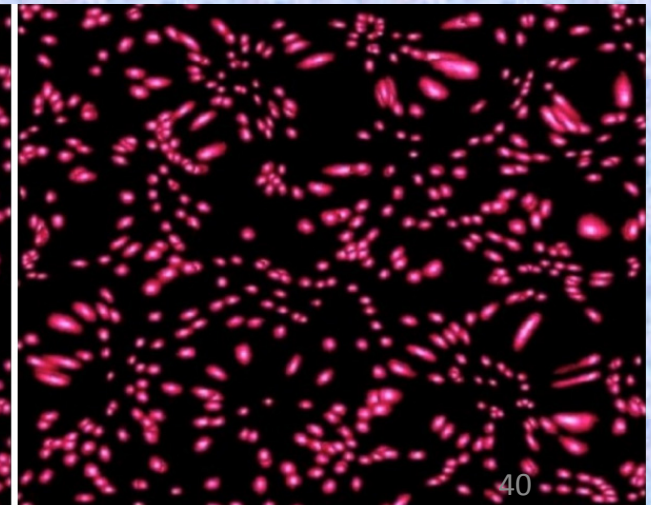
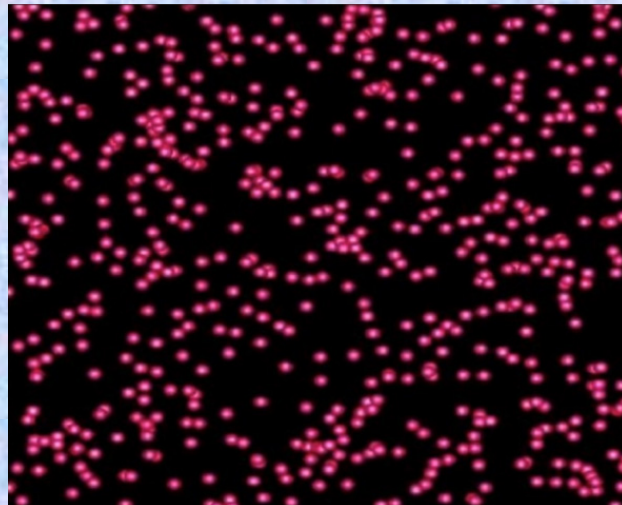
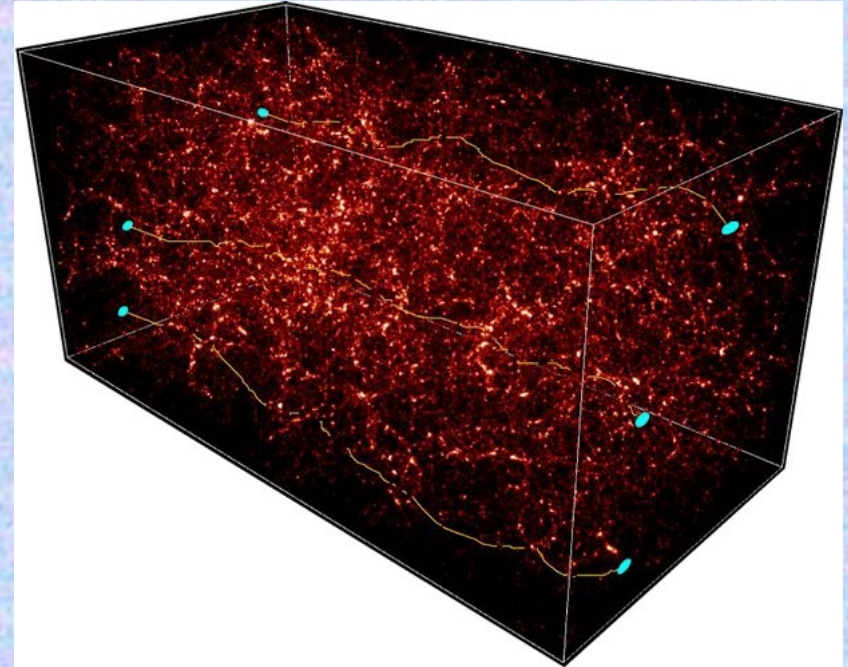


ensemble de galaxies avec  
une orientation aléatoire



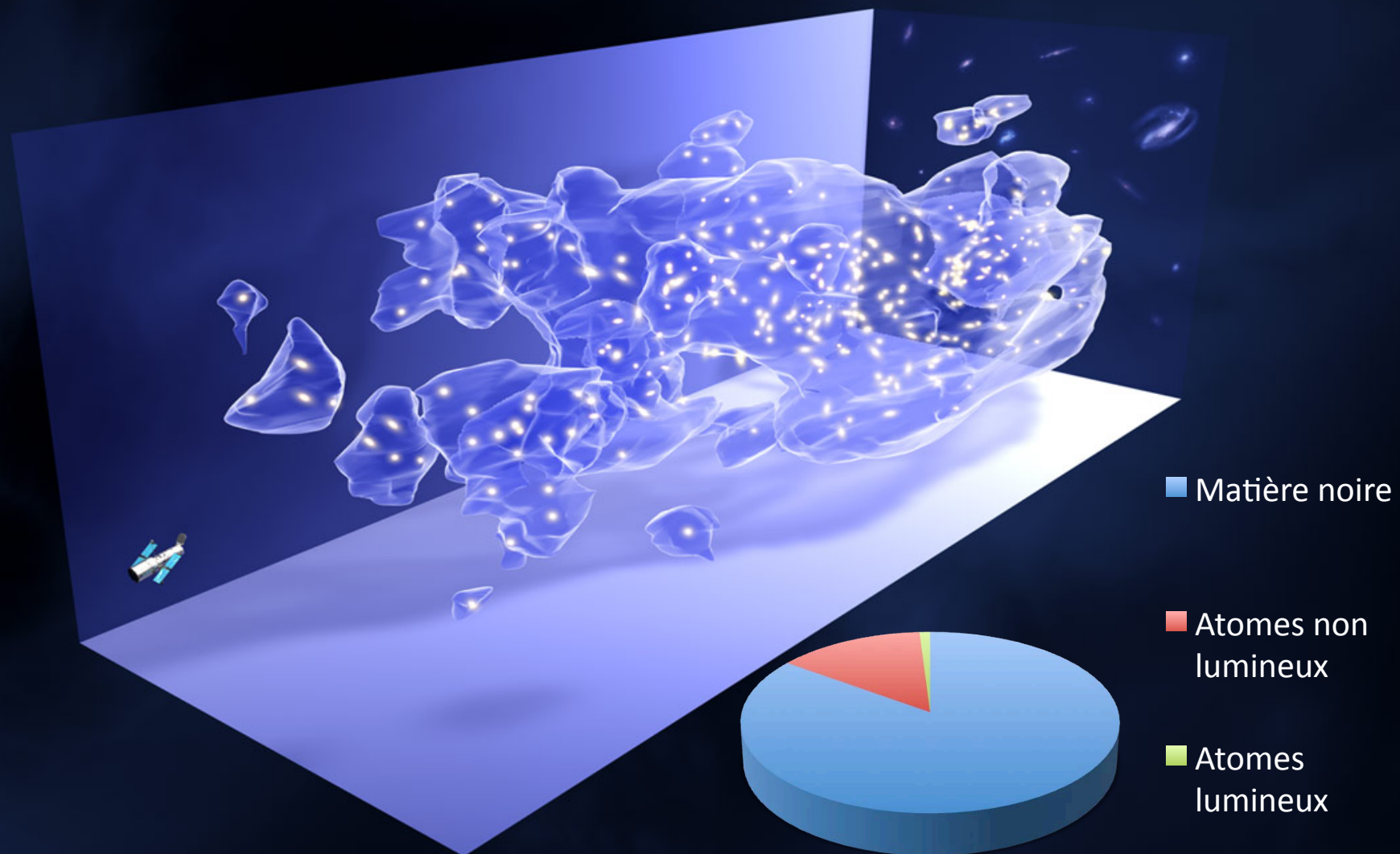
ensemble de galaxies avec  
un alignement

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



# Merci pour votre attention

©Andy Campbell

Plus d'approfondissements sur le sujet: un livre et des activités au niveau du secondaire II

<http://nccr-swissmap.ch/education/highschool/GRcourse>

<https://teaching-relativity.org/Education%20Research%20on%20General%20Relativity/GenevaDescription>



**SwissMAP**

The Mathematics of Physics  
National Centre of Competence in Research





Merci pour votre attention