

« Propriétés et évolution des galaxies »

David Elbaz (delbaz@cea.fr)

Service d'Astrophysique - CEA Saclay
Tel: 01 69 08 54 39

Contexte cosmologique
et grandes questions sur les galaxies

Master Recherche M2 Astronomie & Astrophysique
Enseignement thématique des parcours M2 – Galaxies
http://david.elbaz3.free.fr/master_m2

Le fond diffus cosmologique

Big Bang + 13,8 milliards d'années

Big Bang + 380 000 ans

42 millions d'a.l.

45 milliards d'a.l.



Penzias & Wilson 1965

Horizon cosmologique
= horizon des particules
= limite de l'univers observable

Les zones dont nous recevons aujourd'hui la lumière émise à la recombinaison étaient situées sur une sphère ayant un rayon de 42 millions d'années-lumière autour de nous.

Le fond diffus cosmologique

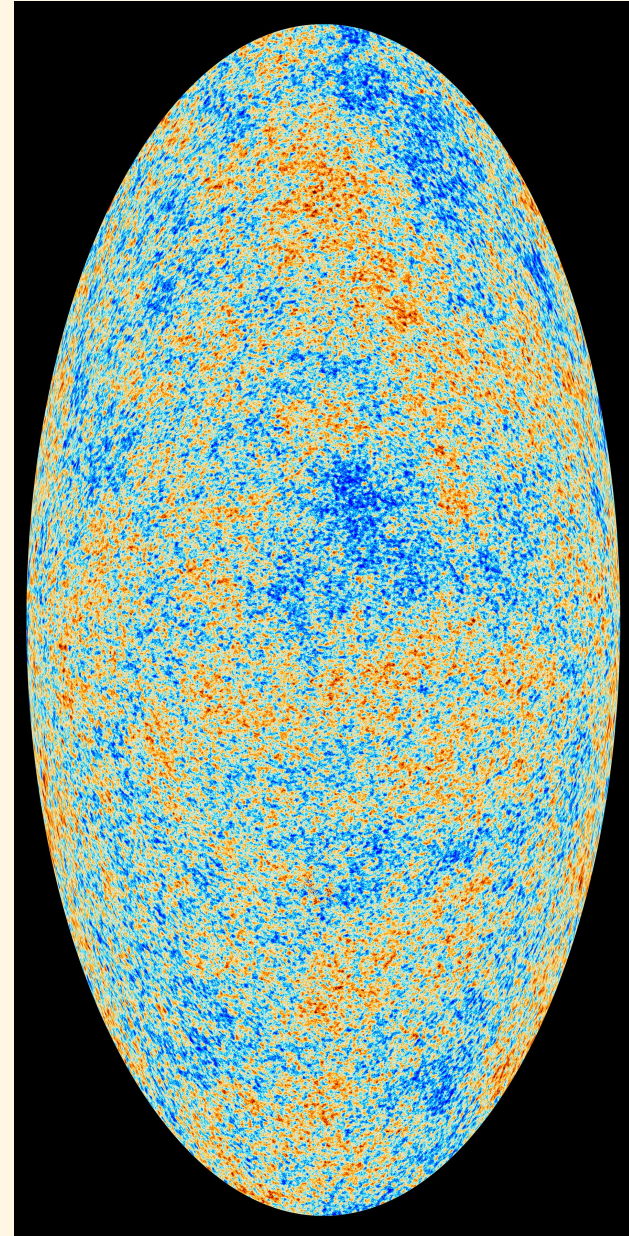
Big Bang + 13,8 milliards d'années

Big Bang + 380 000 ans

42 millions d'a.l.

45 milliards d'a.l.

Satellite Planck

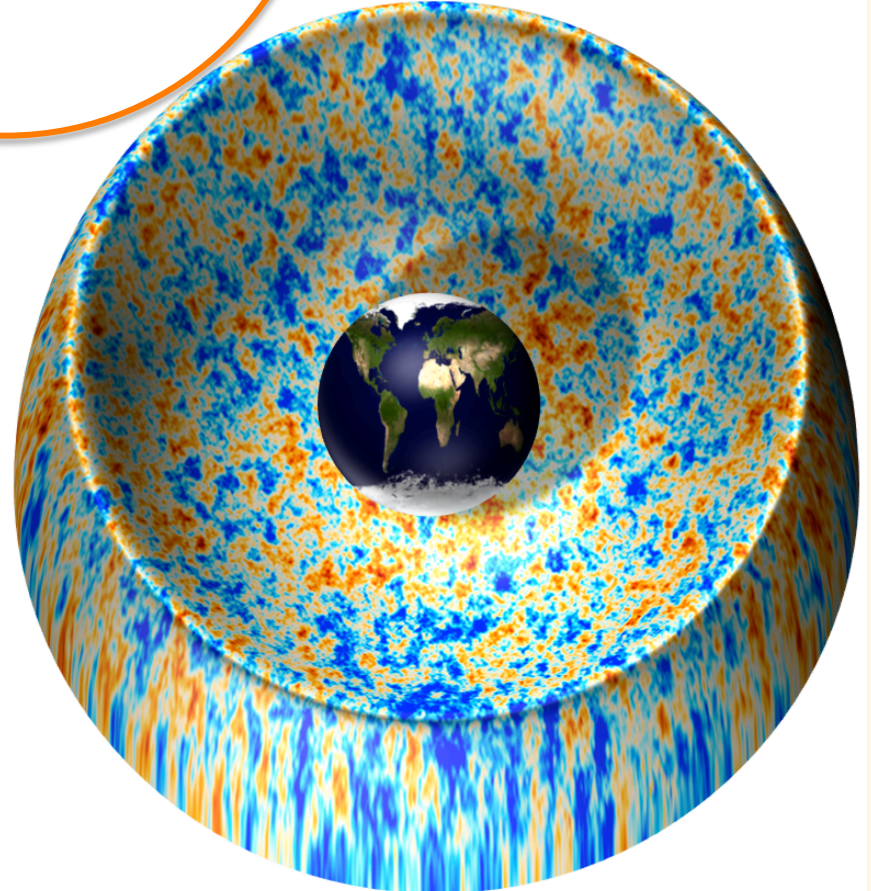
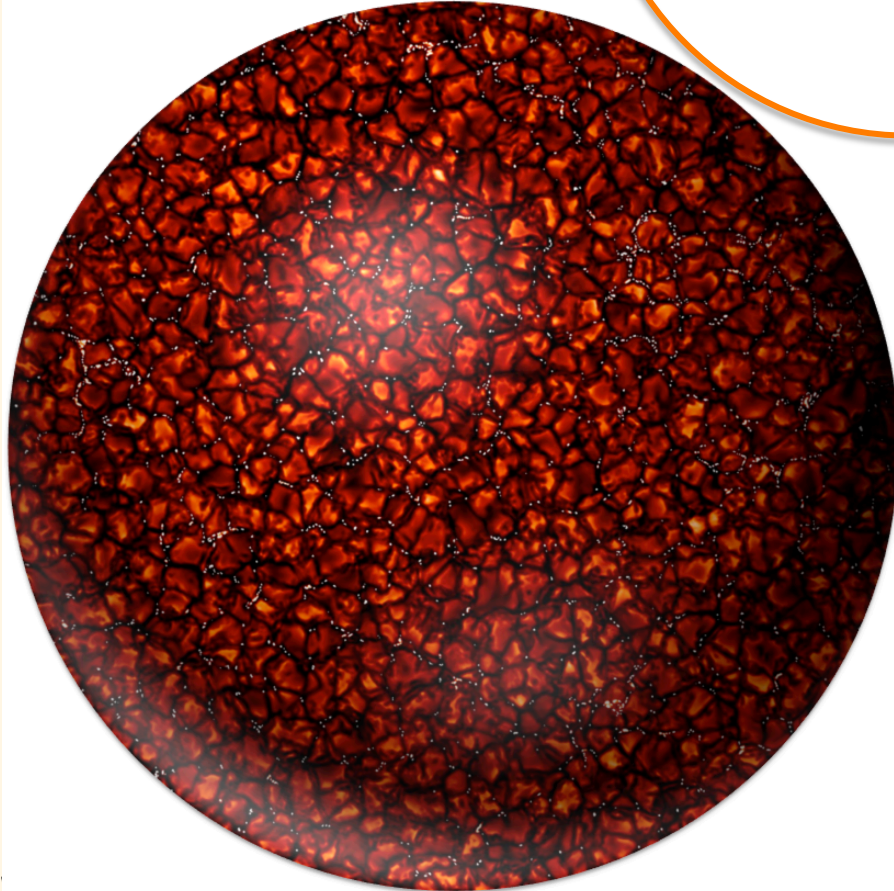


Big Bang + 13,8 milliards d'années

Big Bang + 380 000 ans

42 millions d'a.l.

45 milliards d'a.l.





Le milieu interstellaire contient 1 atome / dé
(1 at./cm³)

s'il s'étendait sur 300 x Voie lactée...
(30 millions d'années-lumière)

Le milieu intergalactique contient : 0.25 atome / m^3

→ rayon de *65 milliards d'années-lumière* pour atteindre le seuil du trou noir...

si on prend en compte la matière noire : 1.65 atome / m^3

→ rayon de *25 milliards d'années-lumière* pour atteindre le seuil du trou noir...



Horizon du « trou noir cosmique » (selon Schwarzschild mais pb singularité)

- Densité critique = $3H^2/8\pi G$
- $H_0=67$, $\Omega_{dm}=0.317$, $\Omega_\Lambda=0.683$ avec : $\Omega_{dm}=0.268$, $\Omega_b=0.049$
 $[H_0(\text{secondes})= 67 / 3.0856 \times 10^{19} \text{ (km/Mpc)} [s^{-1}] = 2.17 \times 10^{-18} [s^{-1}]]$
- Aujourd'hui densité critique : $\rho_c = 3(H_0^s)^2/8\pi G$ où $G=6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$
- $\rho_c = (3 \times 10^5 (H_0^s)^2) / (8 \times 10^5 \times 6.67 \times 10^{-11}) [\text{kg m}^{-3}] = 8.44 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$
- $\rho_m = 0.317 * \rho_c = 2.67 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$

Condition pour un trou noir : rayon de Schwarzschild $R_s = 2GM/c^2 \rightarrow R/M < 2G/c^2$

- où: $2G/c^2 = 1.48 \times 10^{-27} \text{ m/kg}$ et $M = (4/3) \pi R^3 \rho_m$ donc $M/R = (4/3) \pi R^2 \rho_m$
- Trou noir si : $R_s (\text{m}) / M (\text{kg}) \leq 1.48 \times 10^{-27} [\text{m/kg}] \rightarrow (4/3) \pi R_s^2 \rho_m \geq 6.75 \times 10^{26}$

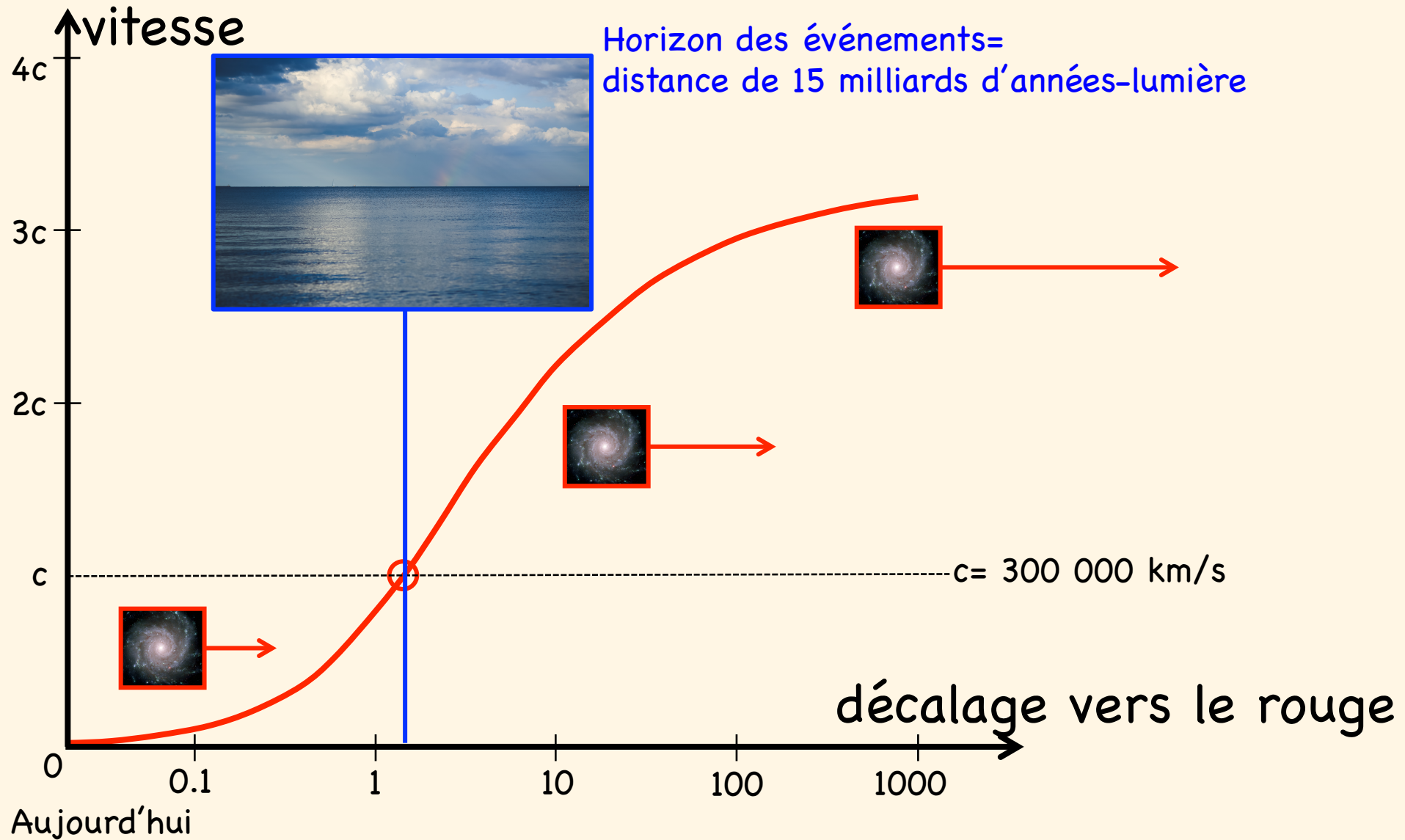
$$\Rightarrow R_s^2 \geq 6.75 \times 10^{26} / ((4/3) \pi \rho_m) = 6 \times 10^{52} \text{ m}$$

$$\Rightarrow R_s \geq 2.46 \times 10^{26} \text{ m} = 24.6 \text{ milliards d'années-lumière} < \text{horizon cosmologique} = 45 \text{ Ga.l.}$$

donc à l'intérieur de notre horizon cosmologique, il y a assez de masse pour engendrer un trou noir selon la définition de Schwarzschild $\rightarrow$ problème: où est la singularité centrale ?

Horizon des événements



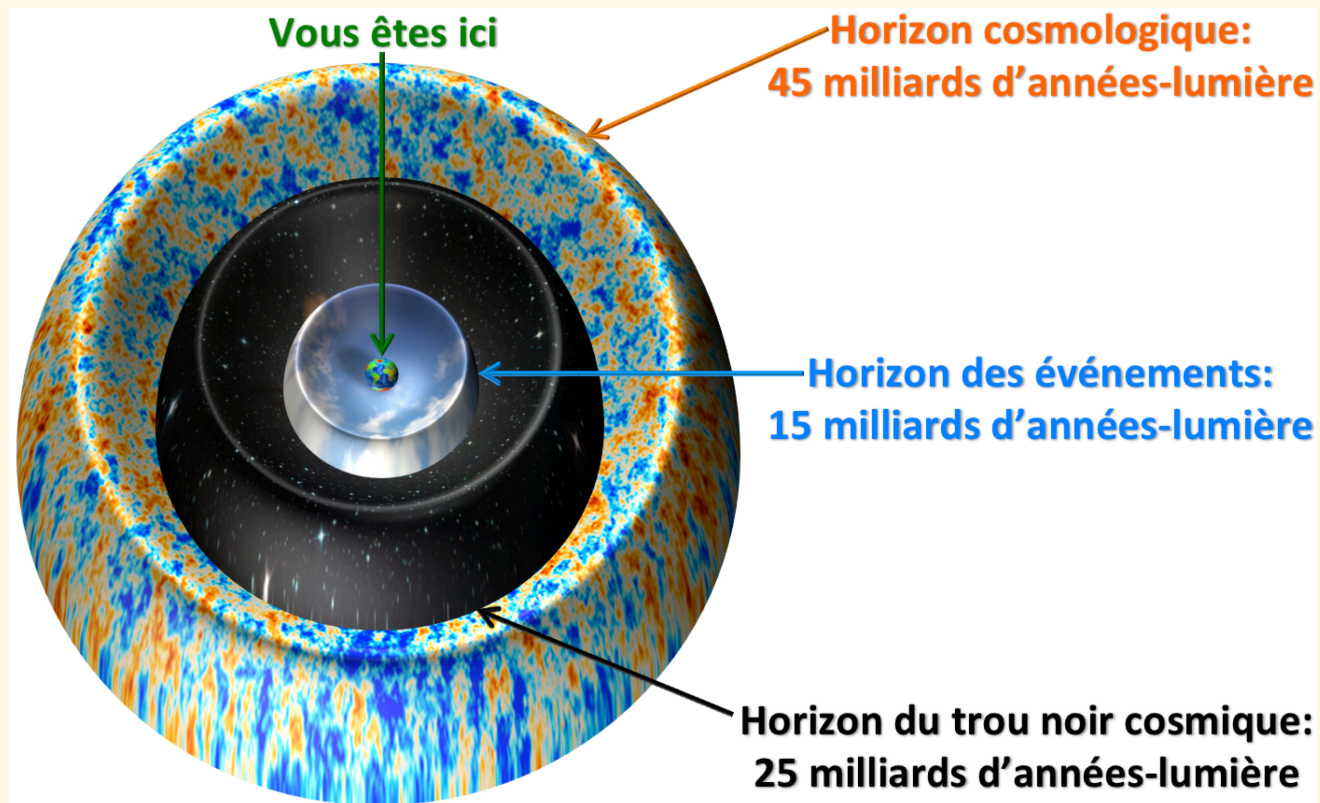


Les 3 horizons

Horizon cosmologique = horizon des particules
= 45 milliards d'années-lumière (45 Gly)

Horizon des événements = zone au-delà de laquelle aucun événement ne nous sera jamais visible
= 15 milliards d'années-lumière (Gly)

rayon de Schwarzschild de l'univers = 25 Gly



Années 1930, dans un bureau à Caltech...

...une discussion entre un prix Nobel de physique, B. Millikan, et son étudiant fraîchement arrivé de Suisse, Fritz Zwicky.

- Monsieur Millikan, j'ai lu tous les articles que vous avez écrits, j'ai écouté toutes les conférences que vous avez données, et je peux vous dire catégoriquement que je n'ai jamais trouvé la moindre idée originale que vous puissiez honnêtement revendiquer comme la vôtre.
- Très bien, jeune homme... et vous ?
- J'ai une idée originale tous les deux ans et j'irais même plus loin : nommez le sujet et je vous apporterai l'idée nouvelle.
- Très bien jeune homme, l'astrophysique.



Fritz Zwicky au télescope du mont Palomar en 1936 (Schmidt de 45cm)





Spherical bastards !

Fritz Zwicky
(1933)

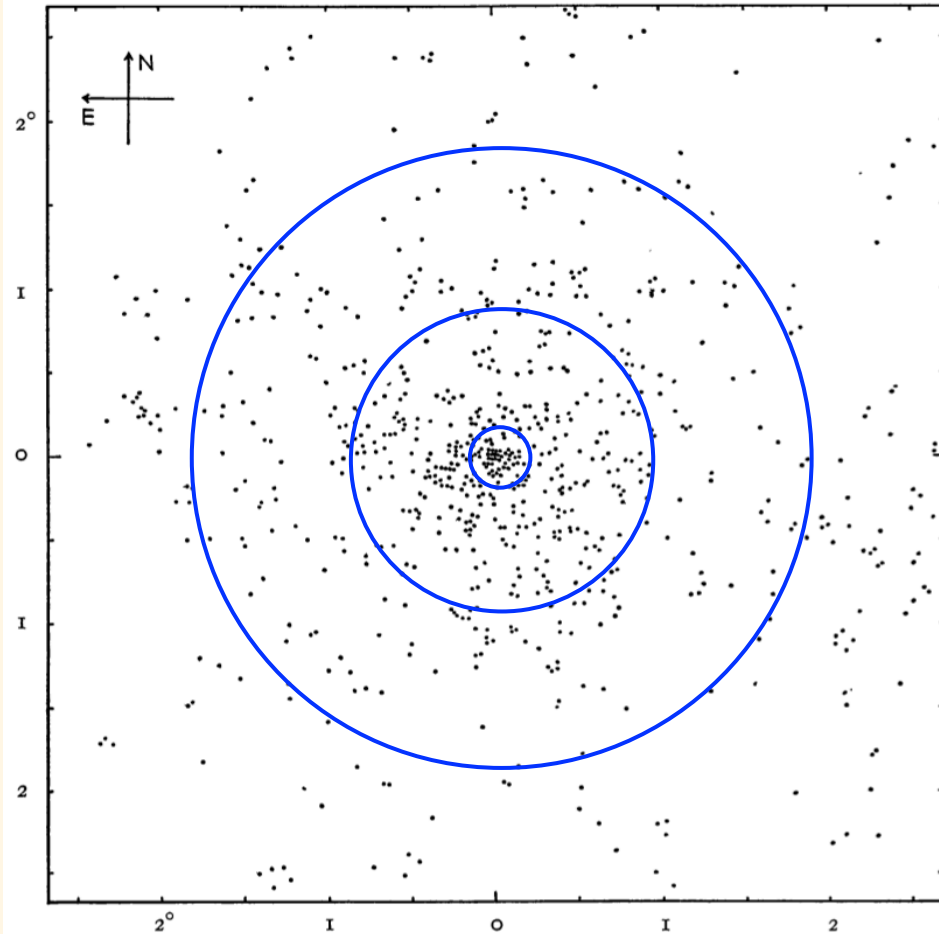


FIG. 3.—The Coma cluster of nebulae

Amas de galaxies de Coma,
la chevelure de Bérénice



« **Théorème du Viriel** » pour un ensemble de galaxies (ou d'étoiles) liées par la gravité (**auto-gravitant**):

masse = taille x vitesse au carré x constante

$$GM/R \sim (\text{dispersion de vitesses})^2 = \sigma_v^2$$

$$M \sim R \times \sigma_v^2$$

Amas de galaxies de Coma,
la chevelure de Bérénice

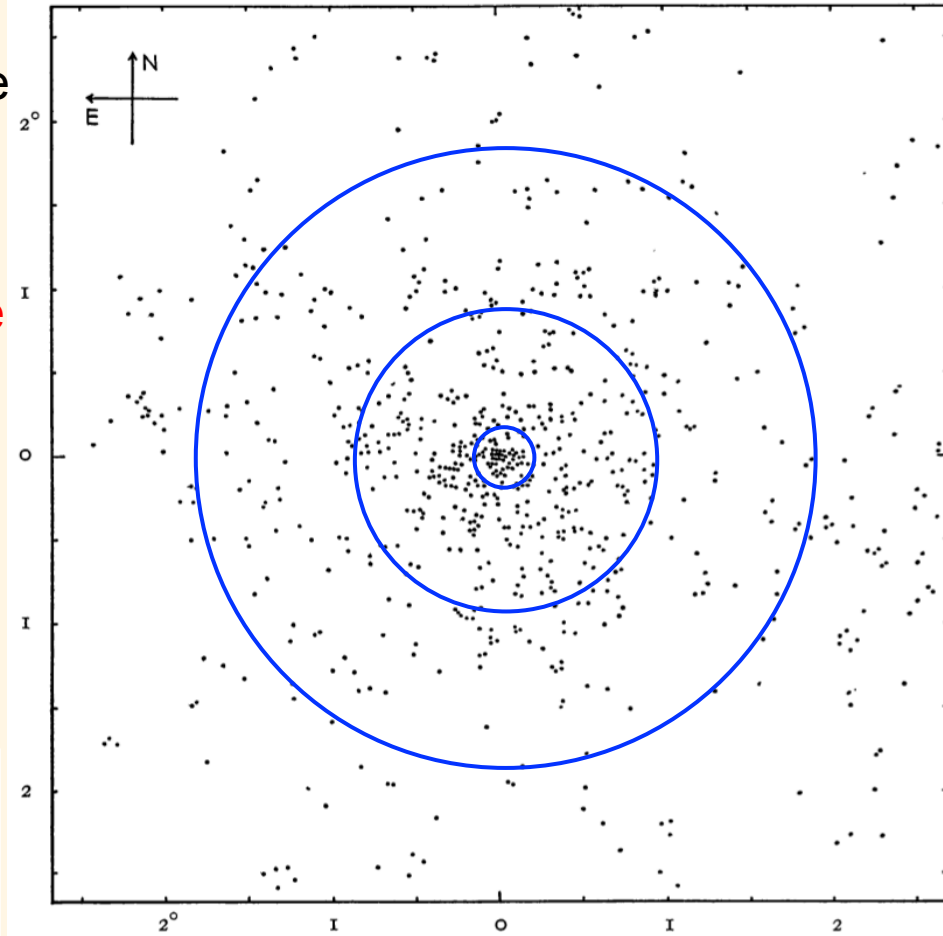


FIG. 3.—The Coma cluster of nebulae

« **Théorème du Viriel** » pour un ensemble de galaxies (ou d'étoiles) liées par la gravité (**auto-gravitant**):

masse = taille x vitesse au carré x constante

$$GM/R \sim (\text{dispersion de vitesses})^2 = \sigma_v^2$$

$$\mathbf{M} \sim \mathbf{R} \times \sigma_v^2$$

Amas de galaxies de Coma:

$$\sigma_v = 1000 \text{ km/s}$$

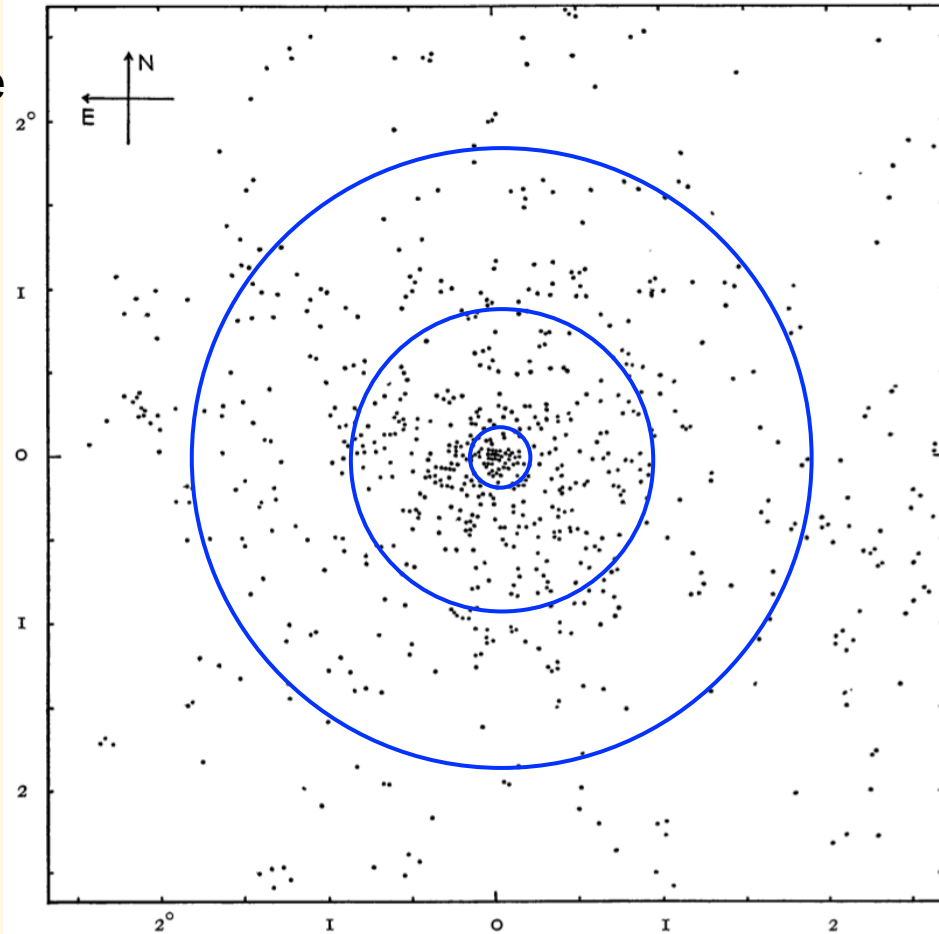
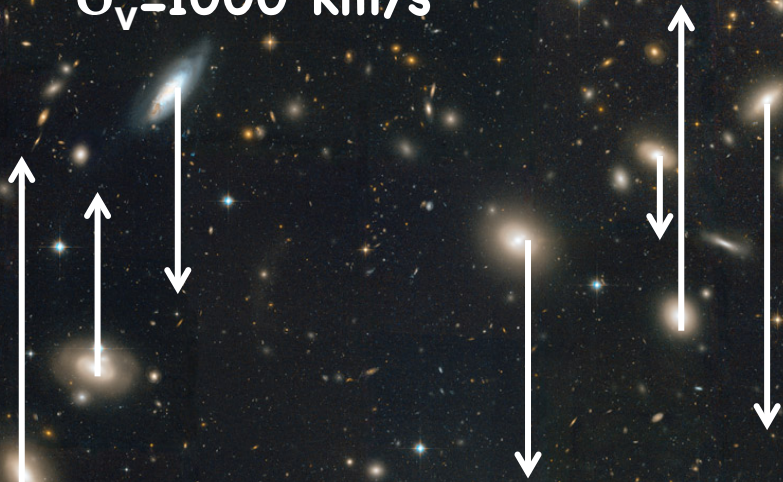
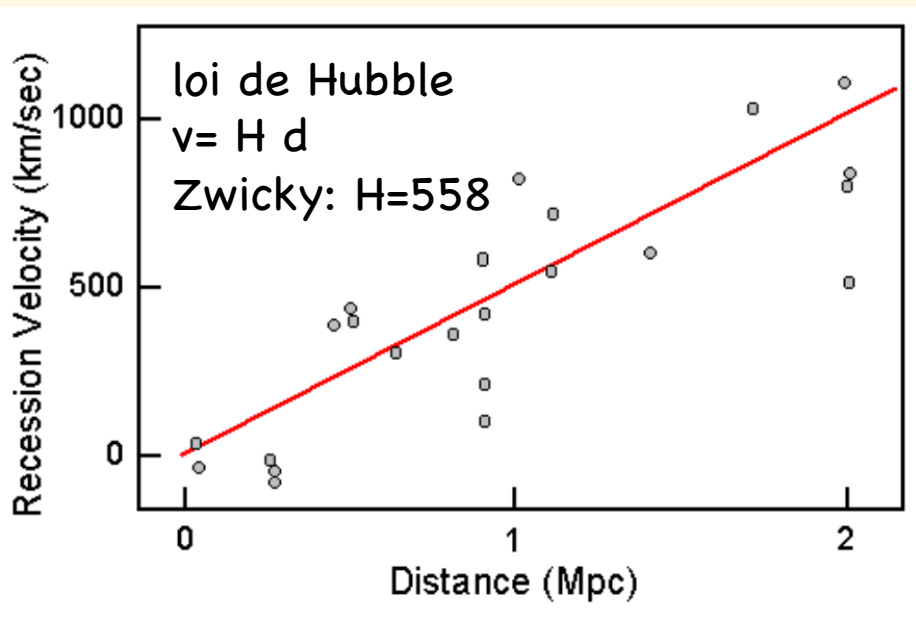
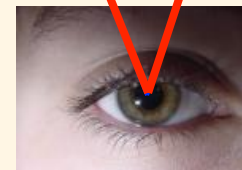
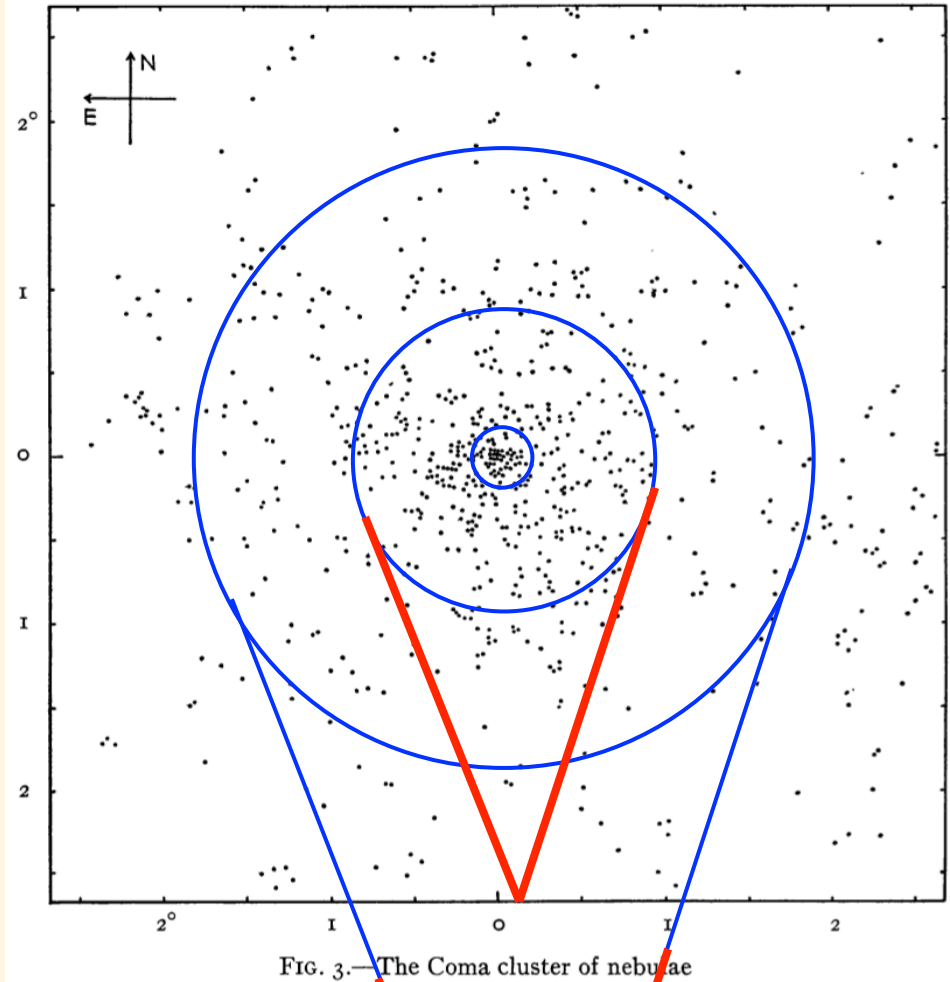
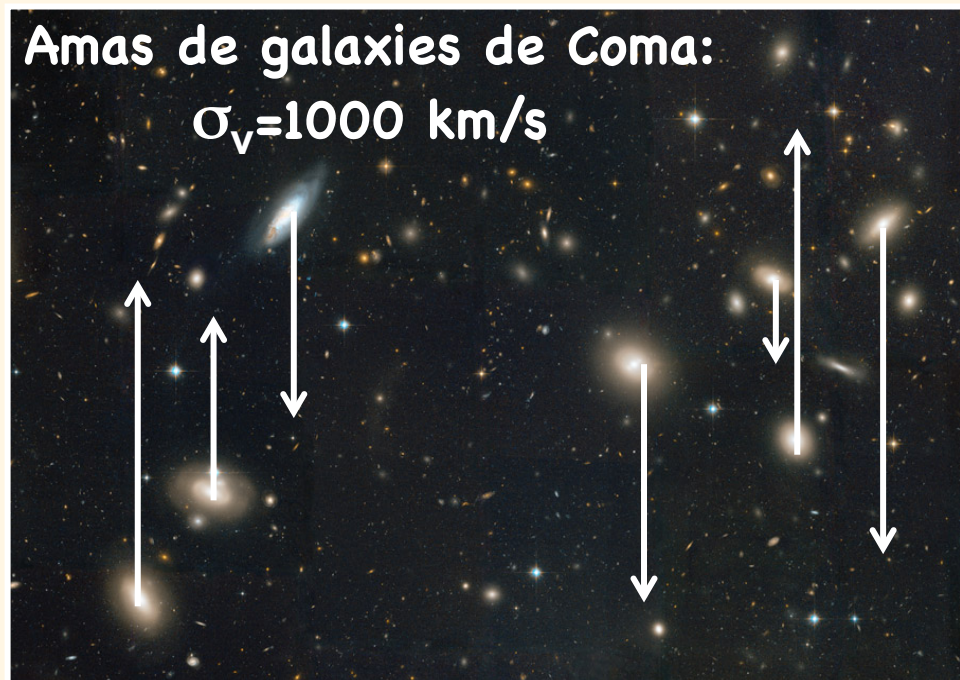


FIG. 3.—The Coma cluster of nebulae



$d(\text{Coma, Zwicky}) = 45 \text{ Mpc}$ au lieu de 320 Mpc
 $\rightarrow$ taille réelle $R/8 \rightarrow$ masse réelle $M/8$!



THE MASS OF THE VIRGO CLUSTER

SINCLAIR SMITH

Astrophysical Journal (1936)

tion function for space velocity. For an assumed distance of 2×10^6 parsecs this function leads to 2×10^{47} g or $10^{14} \odot$ as a value of the mass of the cluster. On the basis of 500 nebulae in the cluster, the mass per nebula is $2 \times 10^{11} \odot$.

Although far larger than Hubble's value of $10^9 \odot$ for the mass of an average nebula, other evidence lends support to the high value obtained from the Virgo Cluster. It is possible that both figures are correct and that the difference represents a great mass of internebular material within the cluster.

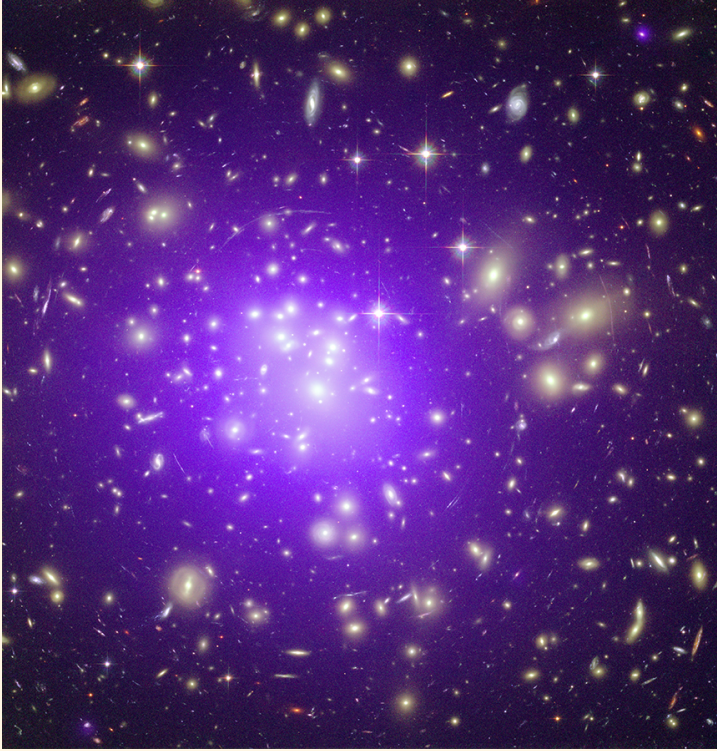
Il faudrait que les « nébuleuses » (ancien nom des galaxies) contiennent beaucoup plus de masse... à moins que cette différence ne soit due à une grande quantité de matière « internébulaire »

→ la matière intergalactique !

On sait aujourd'hui que 80 à 90% de la matière « normale » est située en dehors des galaxies !!!

Abell 1689

il y a 2.3 milliards d'années



CL J1001+0220

il y a 11,2 milliards d'années



**Si on corrige l'erreur de Zwicky sur la distance de l'amas de Coma
et si l'on ajoute la quantité de matière intergalactique au bilan,
Coma contient 6 fois plus de masse que de matière lumineuse !**

→ matière noire 85%, matière lumineuse 15%

ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF CLUSTERS OF NEBULAE

F. ZWICKY

II. MASSES FROM INTERNAL ROTATIONS OF NEBULAE

It has apparently been taken for granted by some astronomers² that from observations on the internal rotations good values for the masses M_N of nebulae could be derived. Values of the order of $M_N = 10^9 M_\odot$ up to $M_N = 4 \times 10^{10} M_\odot$ were obtained in this way,² where $M_\odot = 2 \times 10^{33}$ gr is the mass of the sun. A closer scrutiny of the behavior of suitably chosen mechanical models of stellar systems, unfortunately, soon reveals the fact that the masses of such systems, for a given distribution of average angular velocities throughout the system, are highly indeterminate, and vice versa. This conclusion may, for instance, be derived from the consideration of two limiting models of a nebula as a mechanical system.

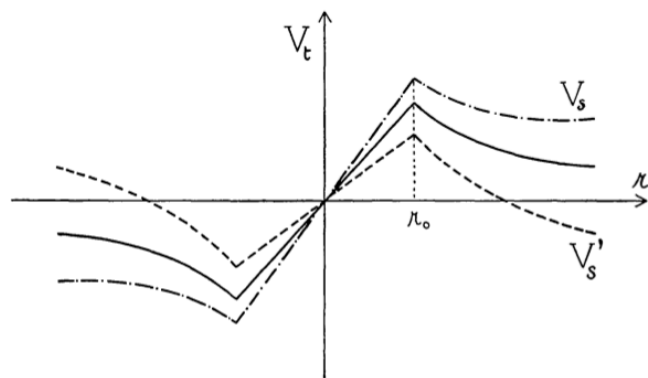


FIG. 1.—Velocity of rotation in nebulae

III. THE VIRIAL THEOREM APPLIED TO CLUSTERS OF NEBULAE

If the total masses of clusters of nebulae were known, the average masses of cluster nebulae could immediately be determined from counts of nebulae in these clusters, provided internebular material is of the same density inside and outside of clusters.

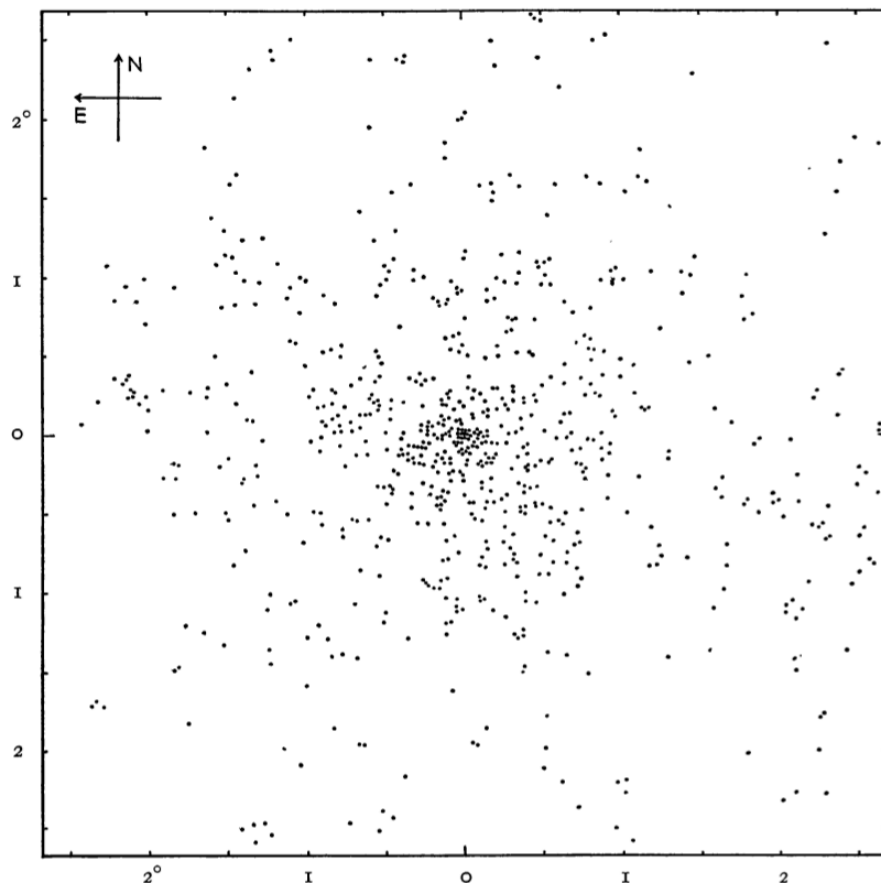


FIG. 3.—The Coma cluster of nebulae

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND
ASTRONOMICAL PHYSICS

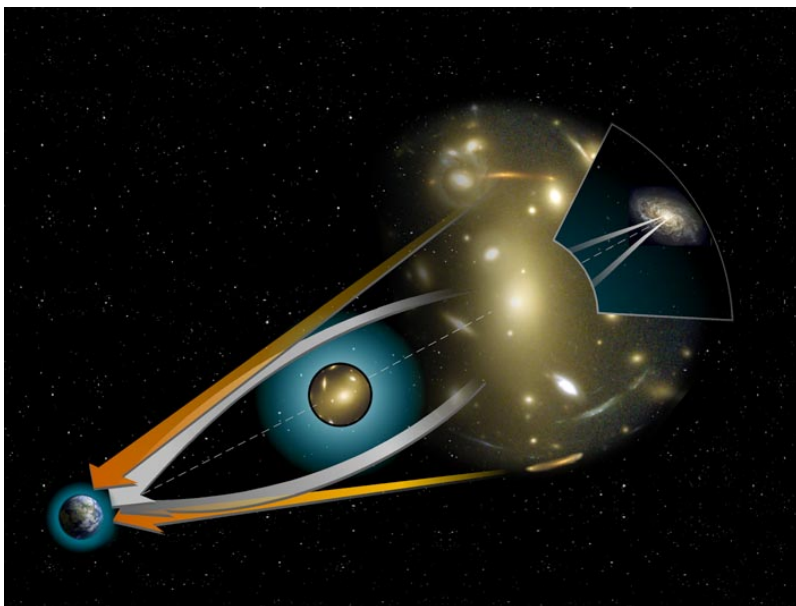
VOLUME 86

OCTOBER 1937

NUMBER 3

ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF CLUSTERS OF NEBULAE

F. ZWICKY



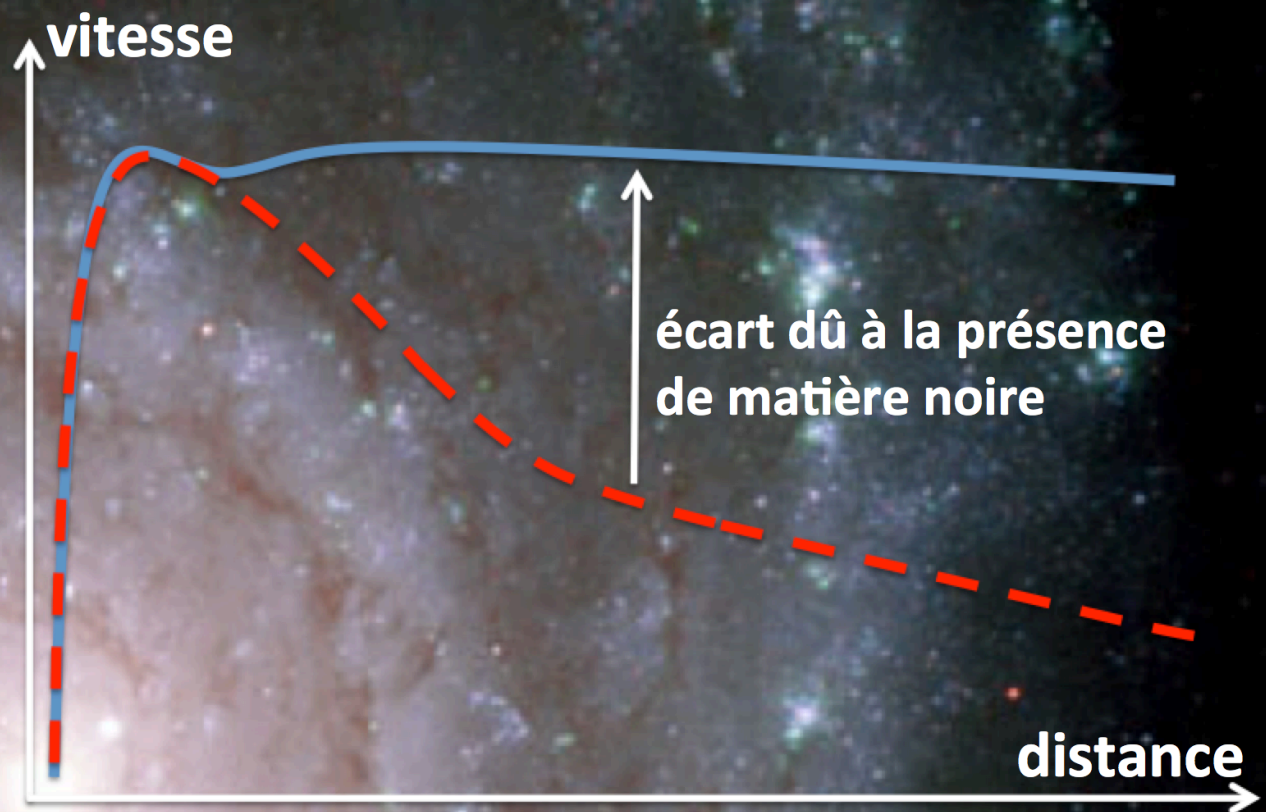
In principle the virial theorem may also be applied to describe the mechanical conditions in an individual nebula. Actually a direct application is difficult, since it is not possible to measure separately, as in the case of a cluster of nebulae, the velocities of the individual units of mass which constitute a nebula. The average square velocity ($\overline{v^2}$) might be derived from the shape of the spectral lines in the light from nebulae. Unfortunately, the practical determination of such shapes is at present exceedingly difficult, if not impossible. In addition the spectral lines in the light of nebulae are doubtless of complex origin, and the interpretation even of well-known shapes of lines is by no means an easy task.

IV. NEBULAE AS GRAVITATIONAL LENSES

As I have shown previously,⁶ the probability of the overlapping of images of nebulae is considerable. The gravitational fields of a number of “foreground” nebulae may therefore be expected to deflect the light coming to us from certain background nebulae. The observation of such gravitational lens effects promises to furnish us with the simplest and most accurate determination of nebular masses. No thorough search for these effects has as yet been undertaken. It would seem, perhaps, that if the masses of field nebulae were, on the average, as great as the masses of cluster nebulae obtained in section iii, gravitational lens effects among nebulae should have been long since discovered. Until many plates of rich nebular fields taken under excellent conditions of seeing have been carefully examined it would be dangerous, however, to draw any definite conclusions.



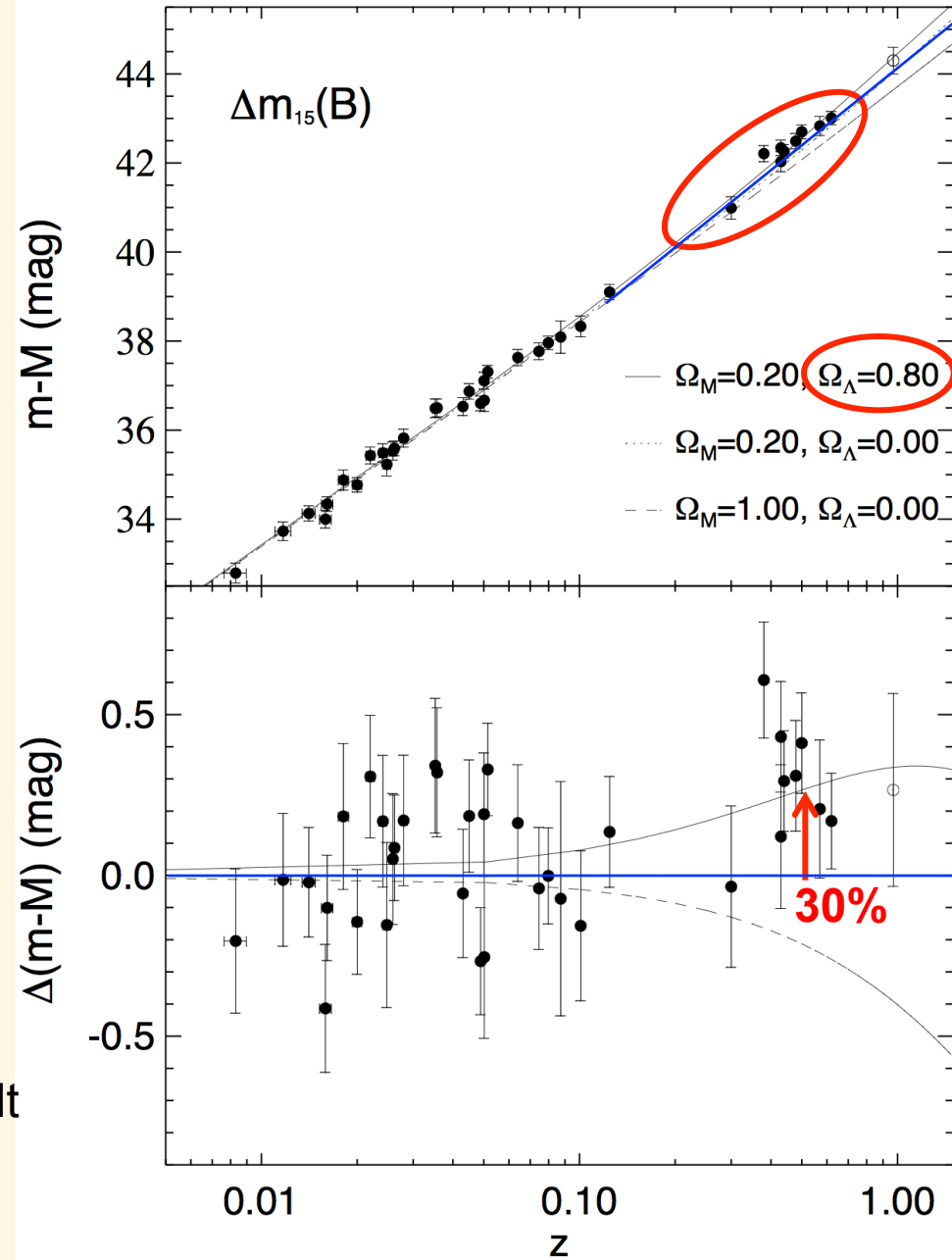
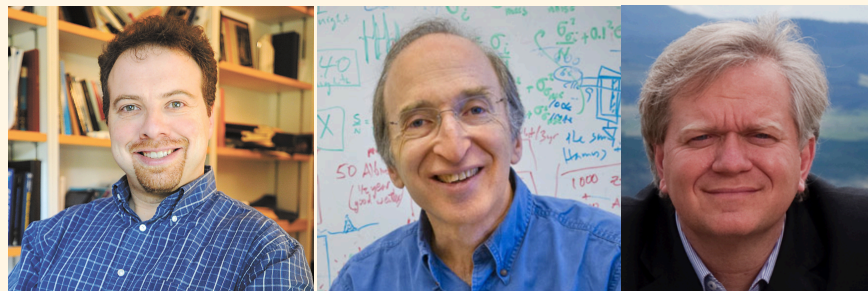
**Vera Rubin
(1970)**



Adam Riess: « quand vous lirez ce qui va suivre, ne croyez pas ce que votre cœur et votre raison voient mais ce que vos yeux voient »

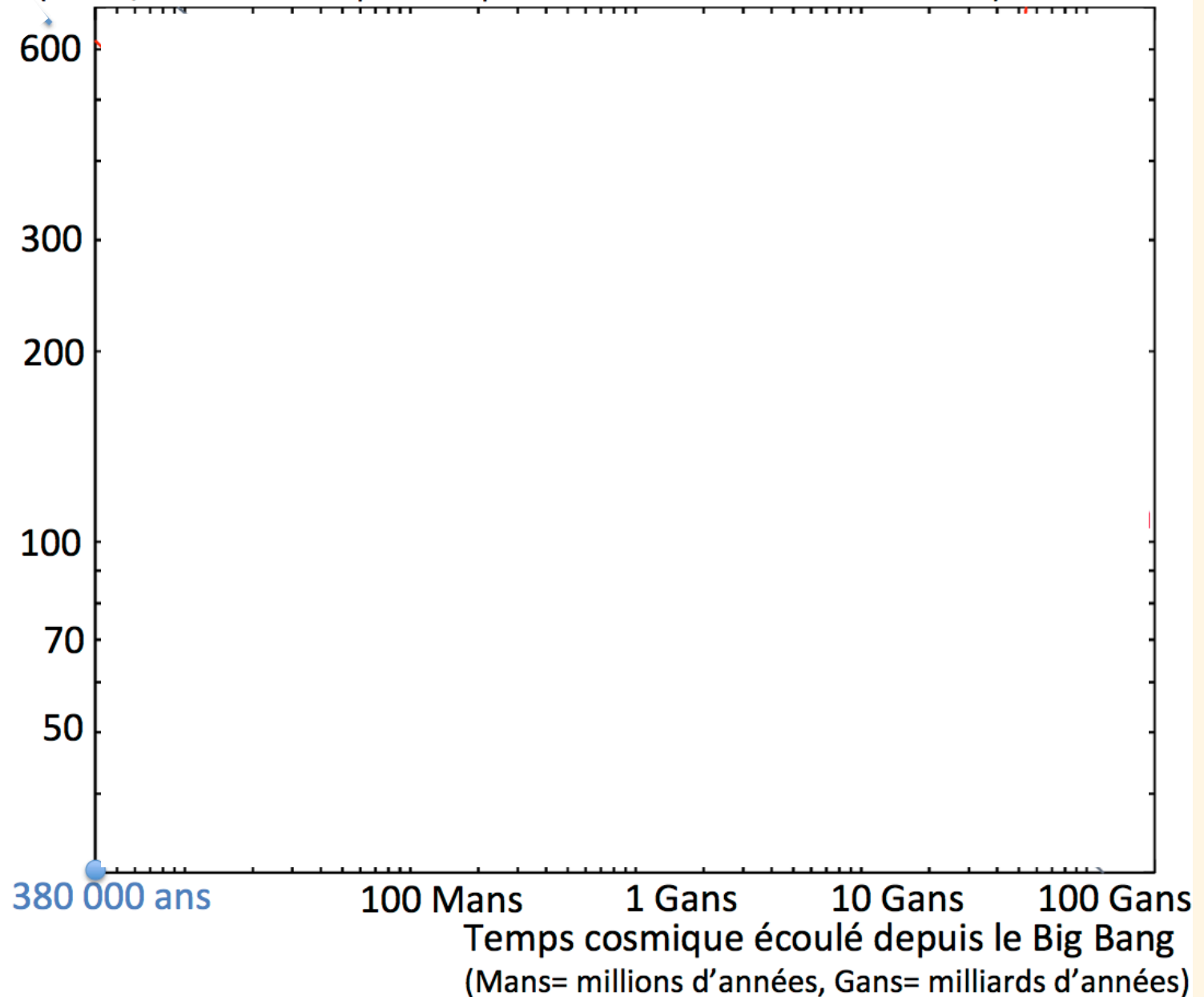


lauréats du prix Nobel 2011



Taux d'expansion de l'univers

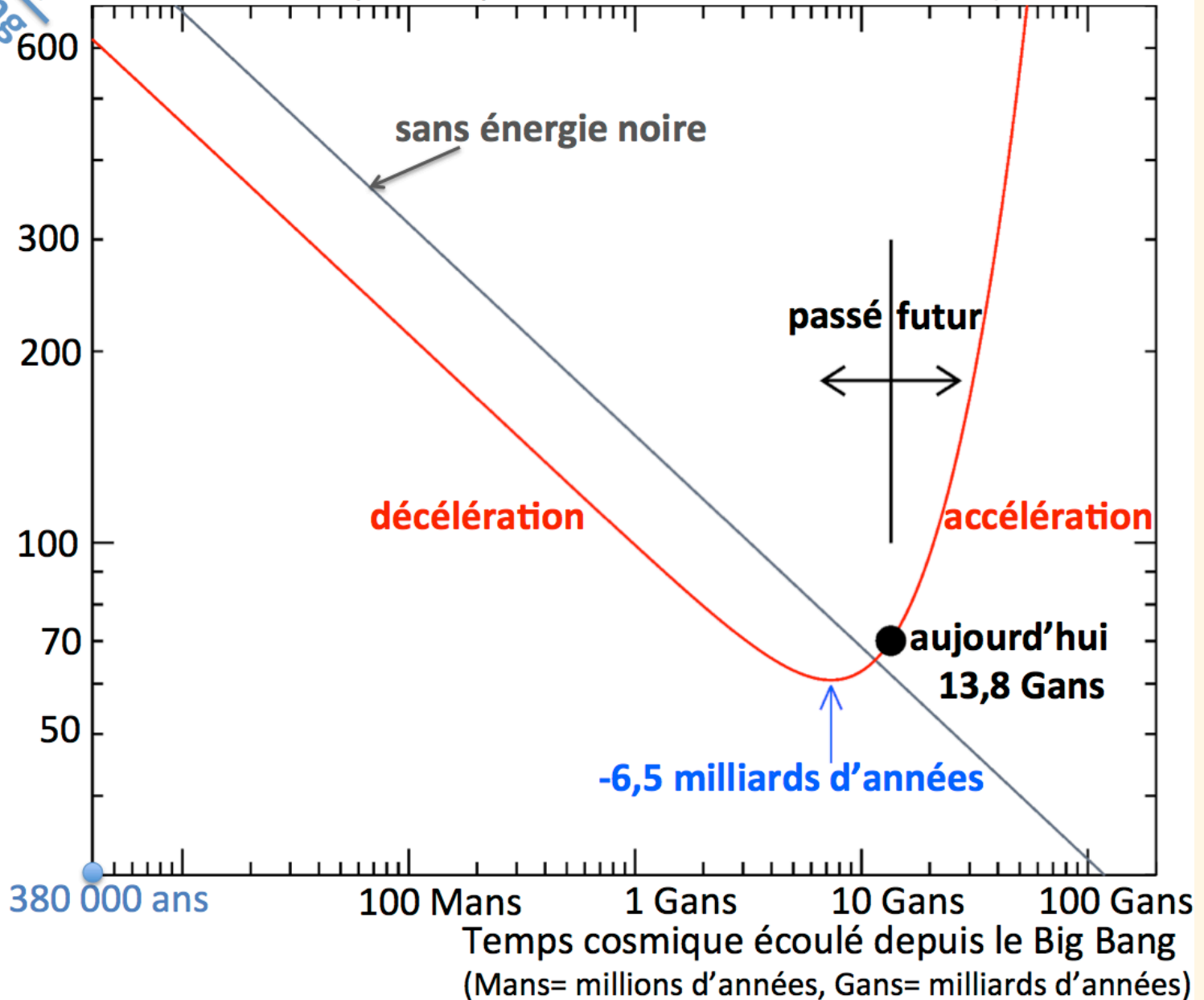
(en km/sec entre deux points séparés de 3 millions d'années-lumière)

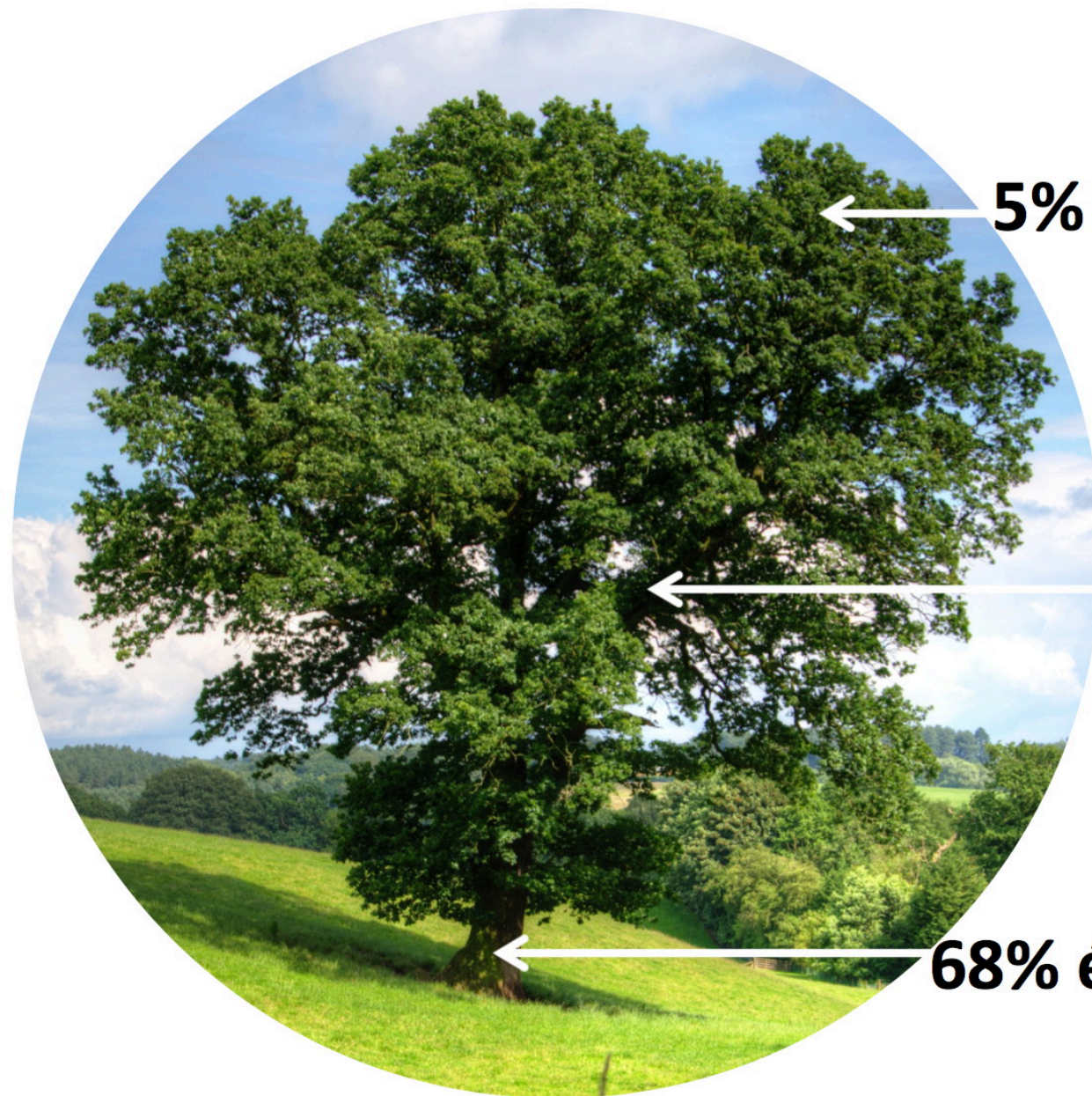


Big Bang

Taux d'expansion de l'univers

(en km/sec entre deux points séparés de 3 millions d'années-lumière)

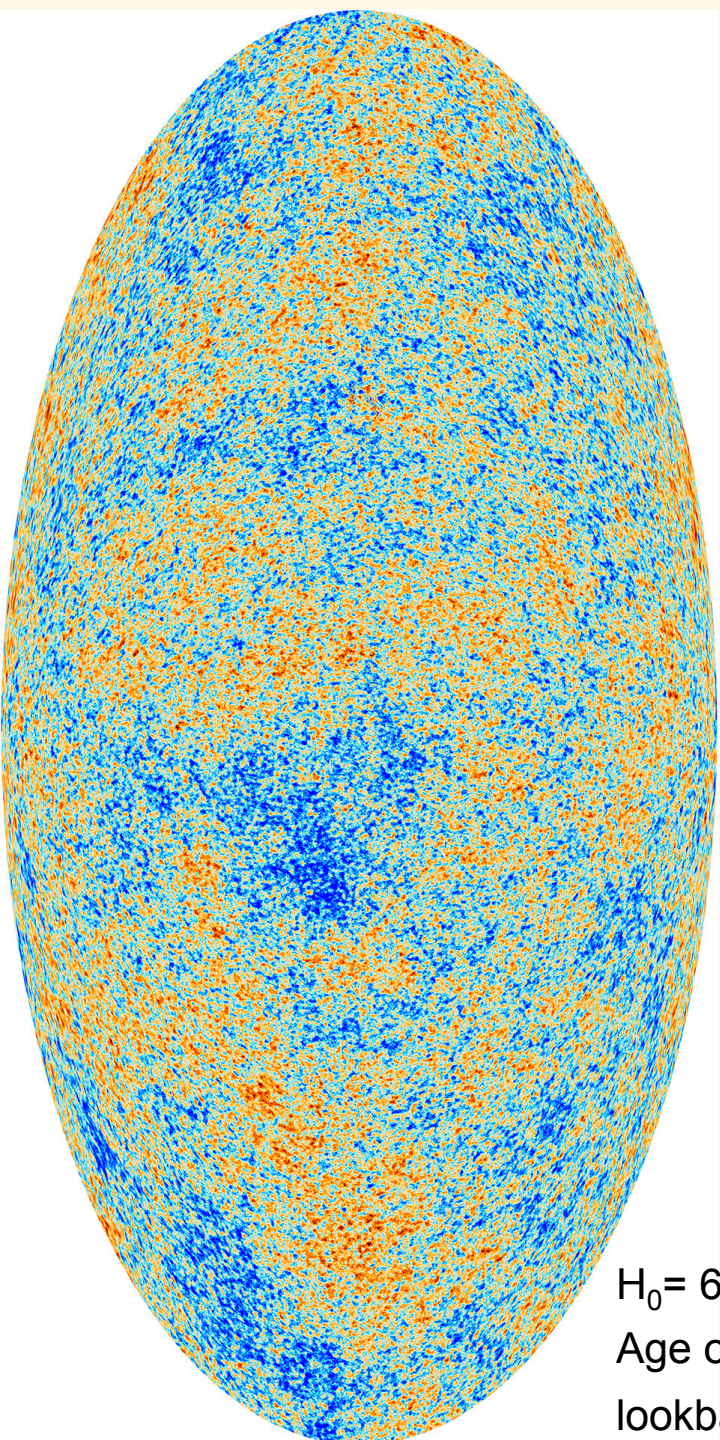




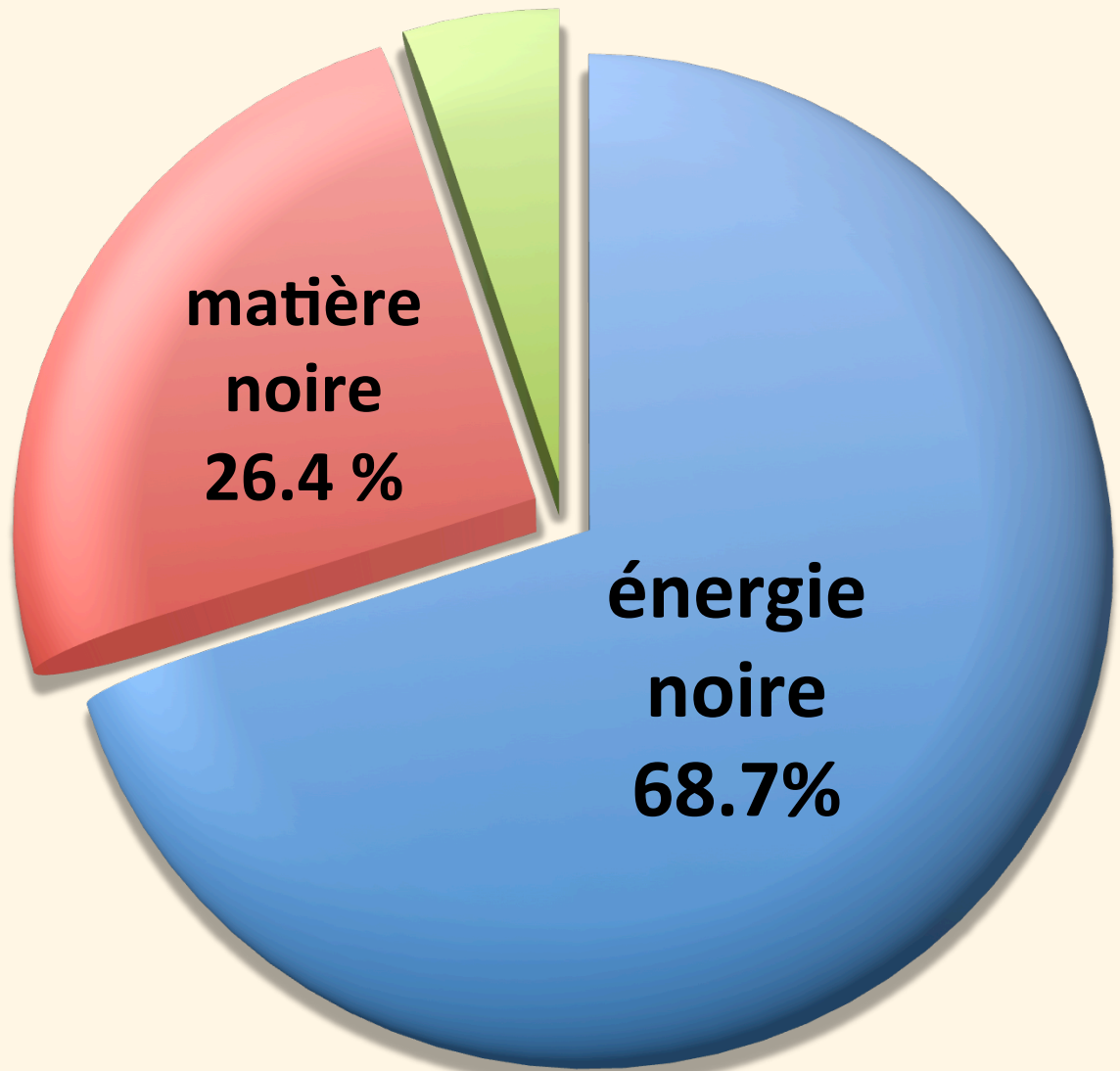
**5% matière normale
= feuilles**

**27% matière noire
= branches**

**68% énergie noire
= tronc**



Matière « normale »
0,5% galaxies + 4,4% matière intergalactique

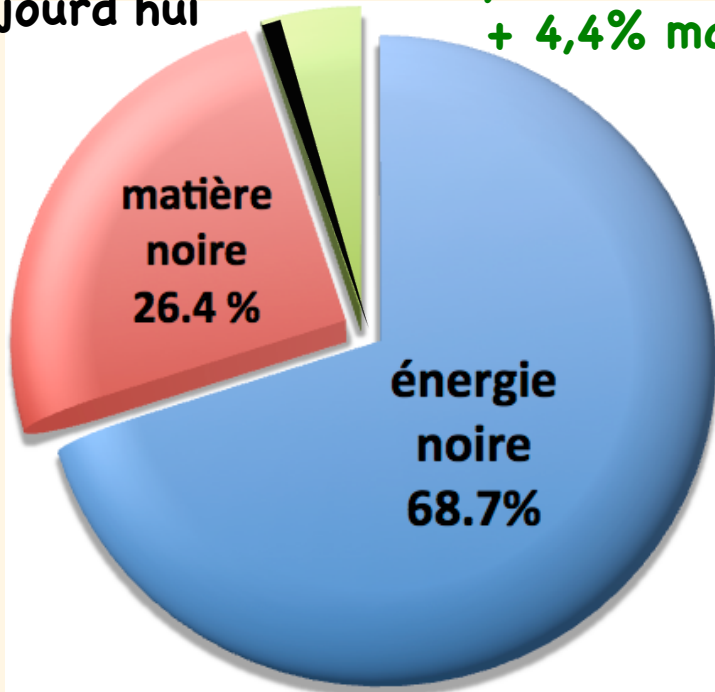


$H_0 = 67 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$ $\Omega_m = 0.313$, $\Omega_\Lambda = 0.687$, $\Omega_b = 0.04857$, $\Omega_{dm} = 0.264$

Age of universe ($z=0$) = 13.8 Gyr

lookback time : $z=2 \rightarrow 10.6 \text{ Gyr}$ [76%]; $z=1 \rightarrow 8 \text{ Gyr}$ [58%]

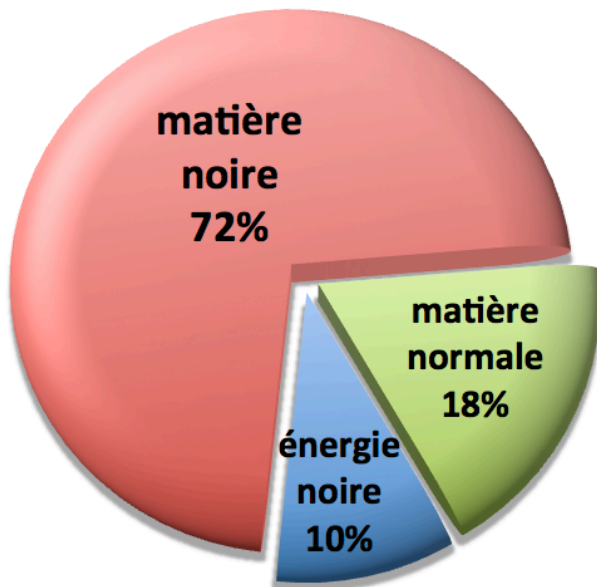
aujourd'hui **4,9% baryons: 0,5% étoiles + 4,4% matière intergalactique**



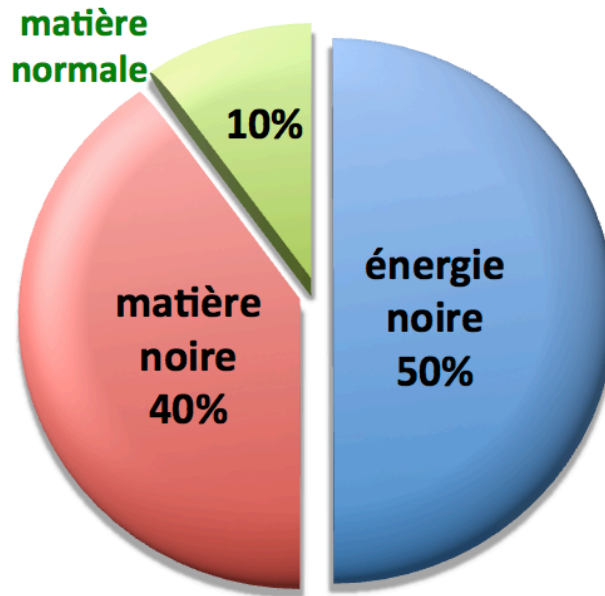
accélération de l'univers:
- 6,5 milliards d'années

équpartition matière-énergie:
- 3,6 milliards d'années

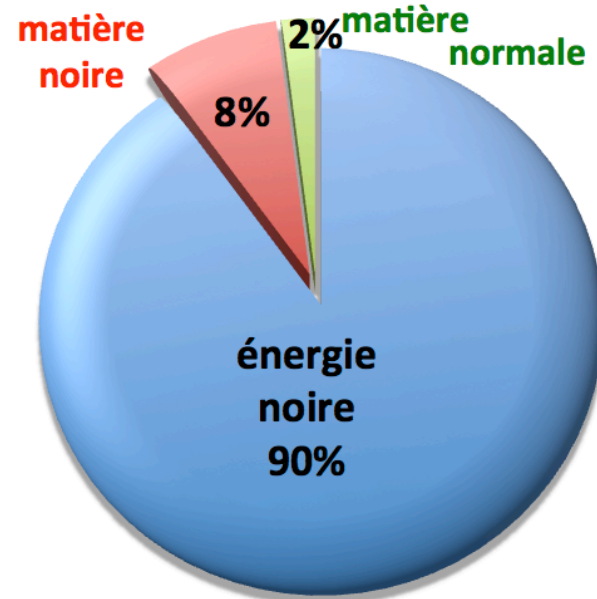
Il y a 10 milliards d'années

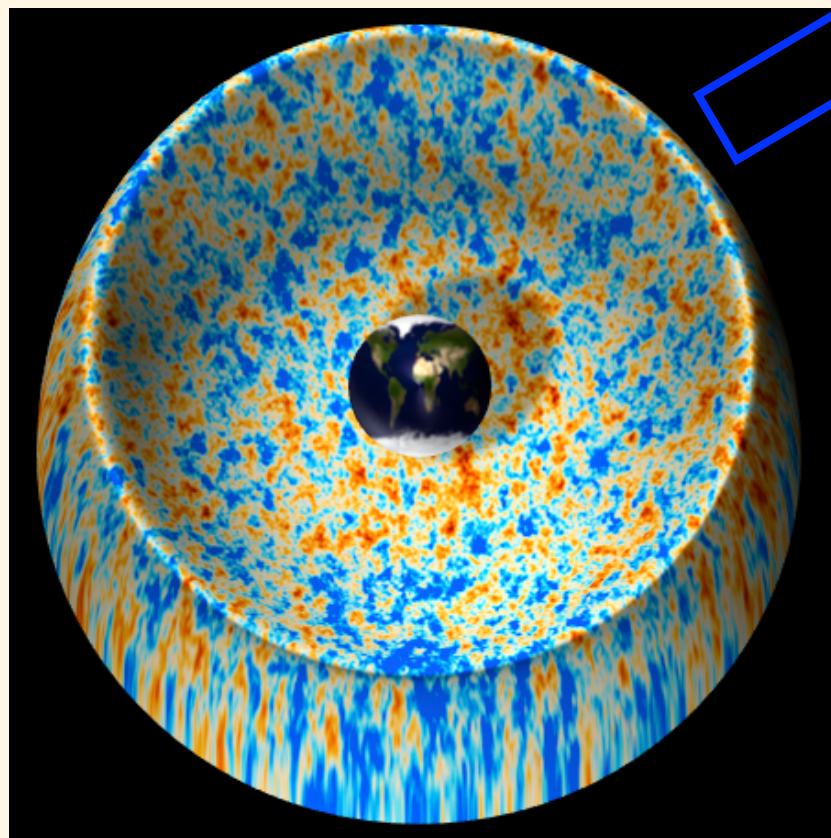


Il y a 3,6 milliards d'années



Dans 7 milliards d'années





Aujourd'hui
fort contraste de densité

-13,8 Ga: univers homogène à 0,001%

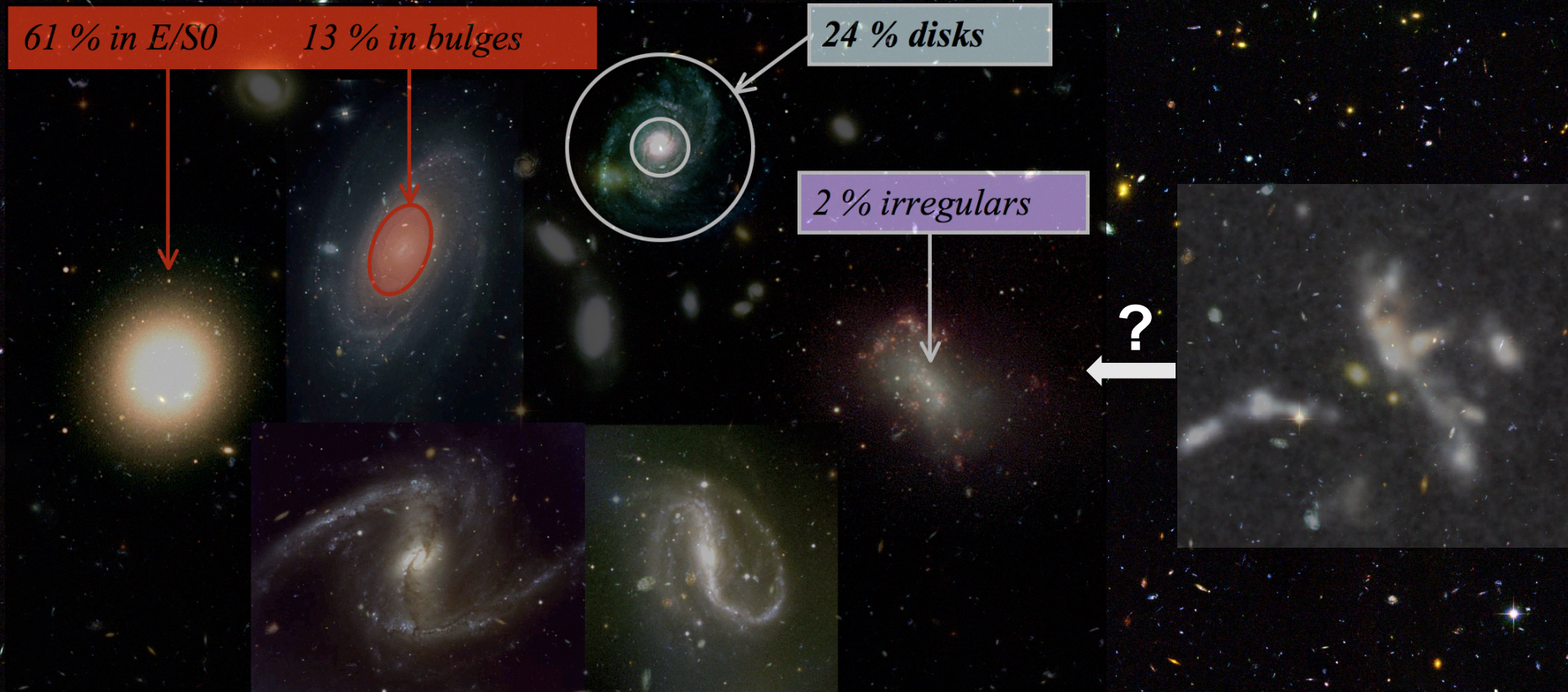
61 % in E/S0

13 % in bulges

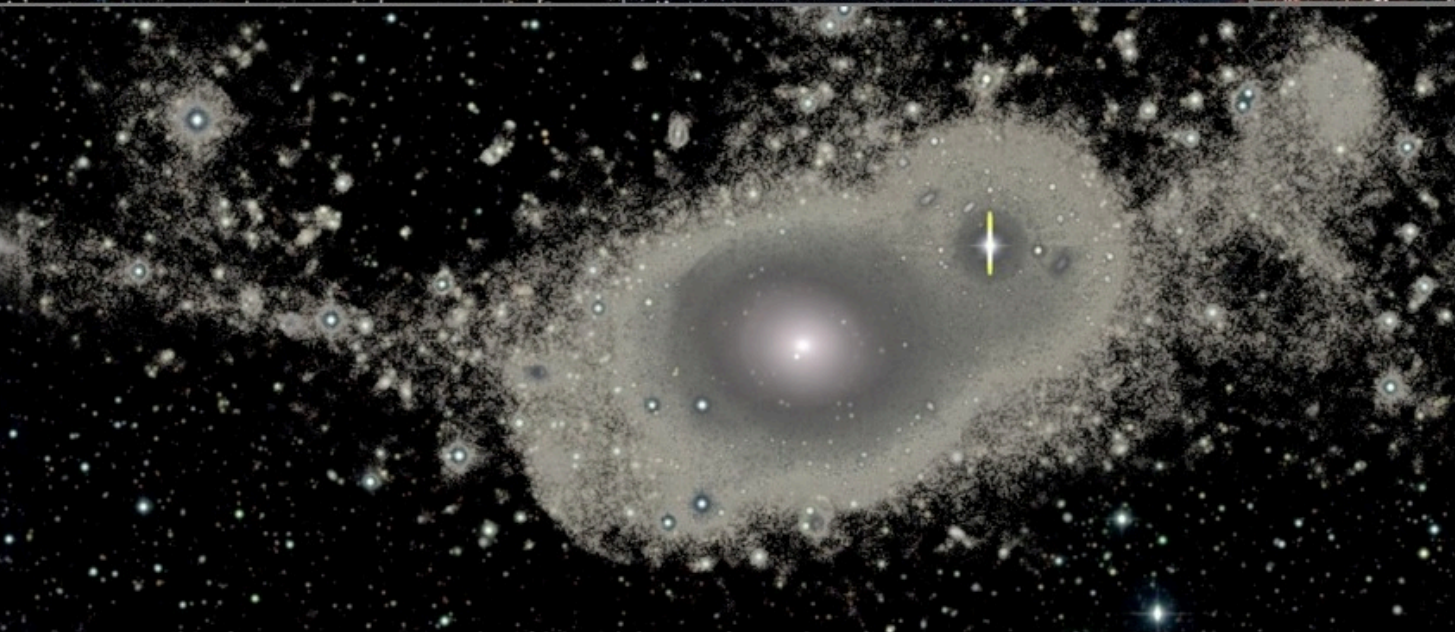
24 % disks

2 % irregulars

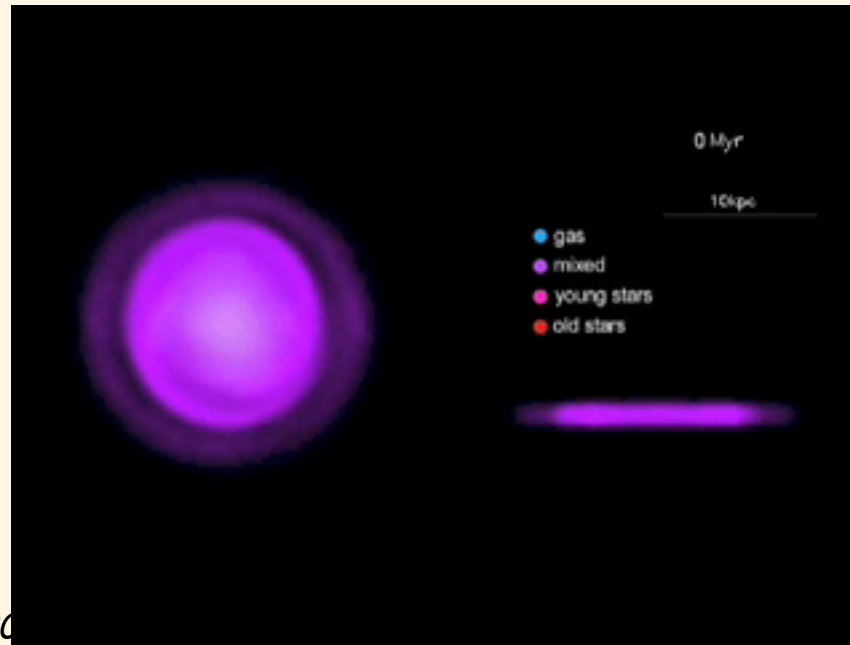
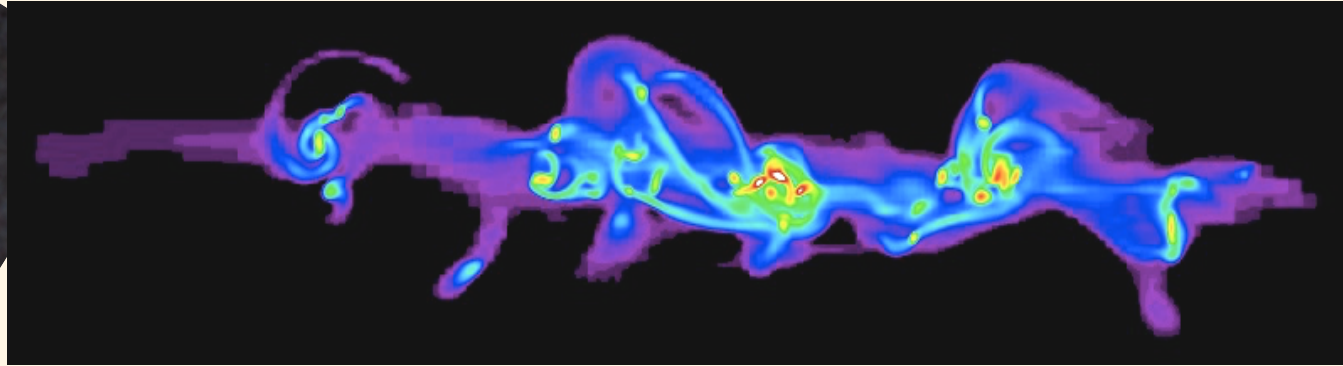
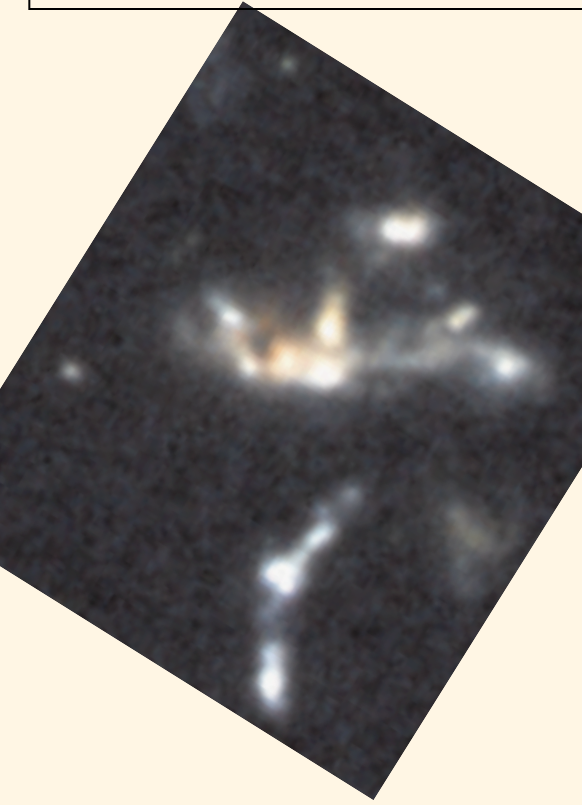
?

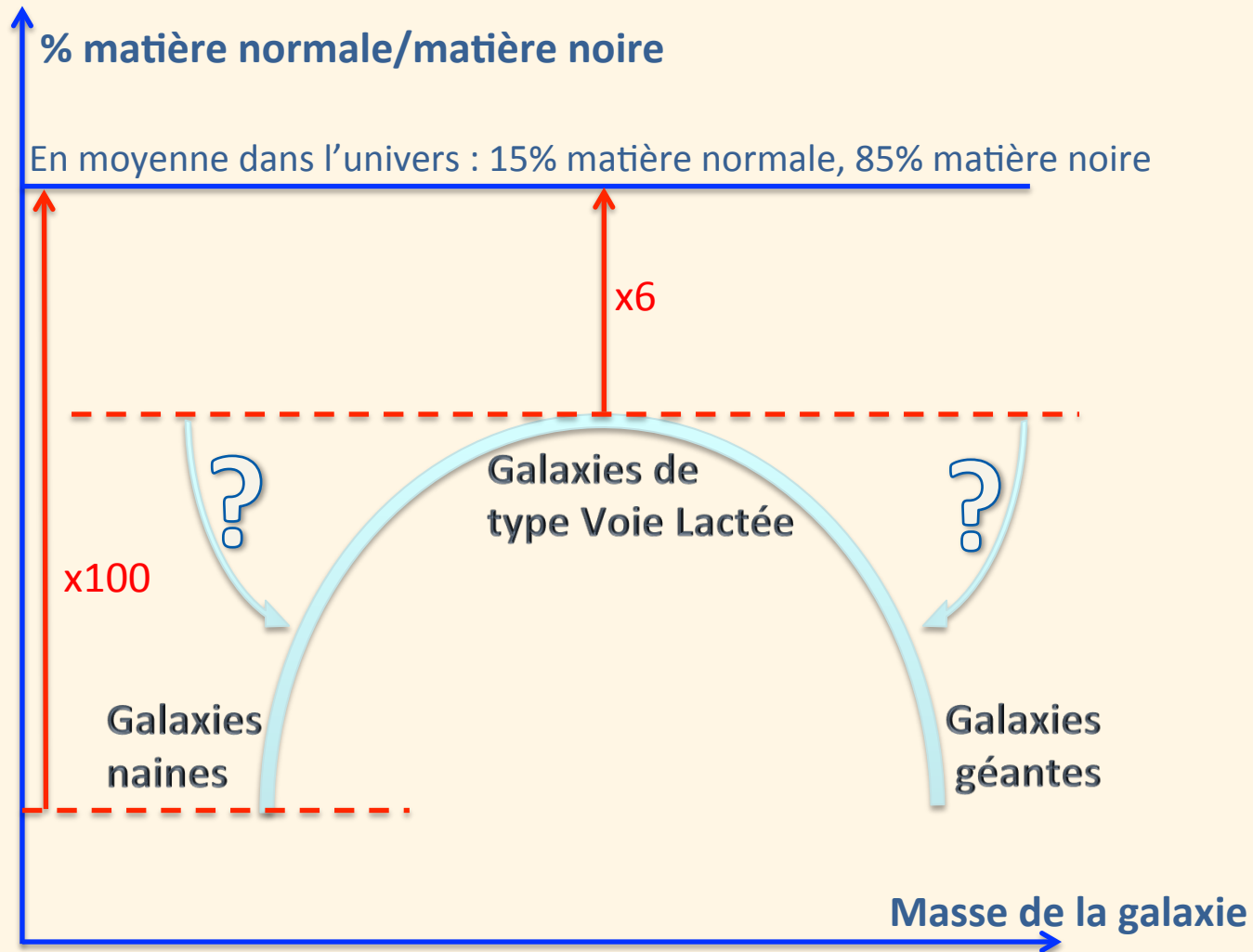


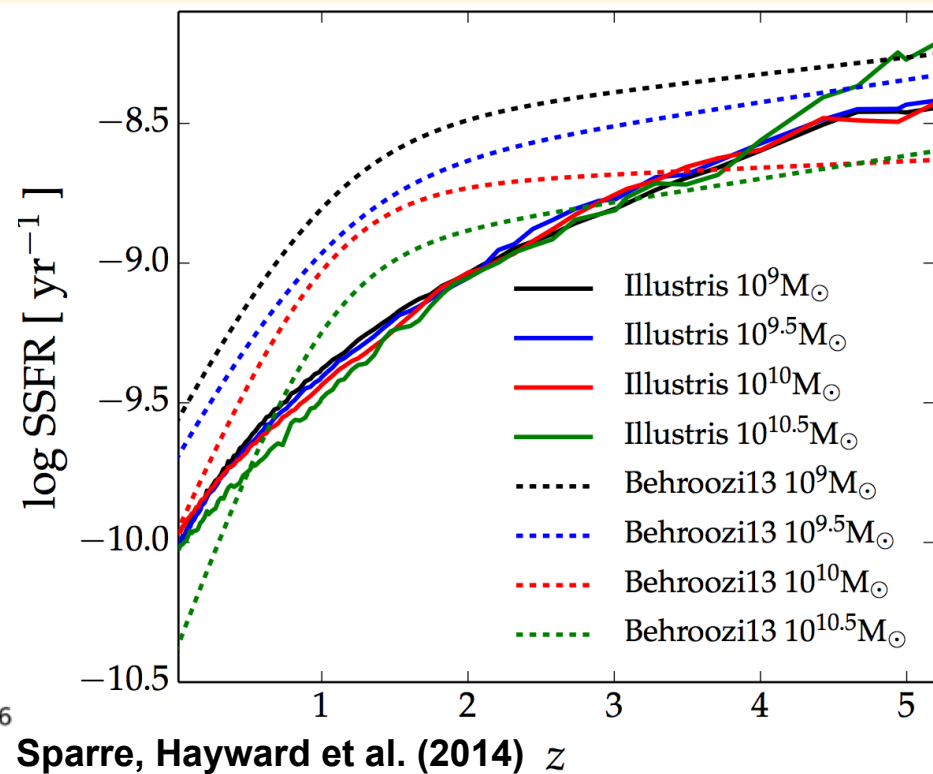
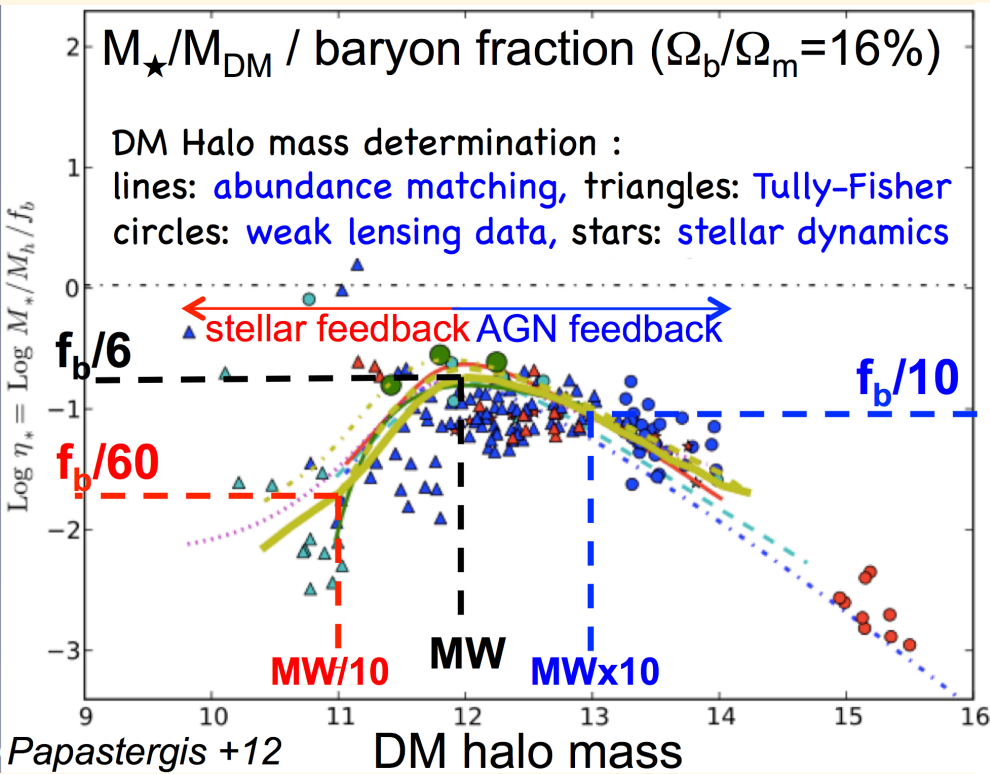




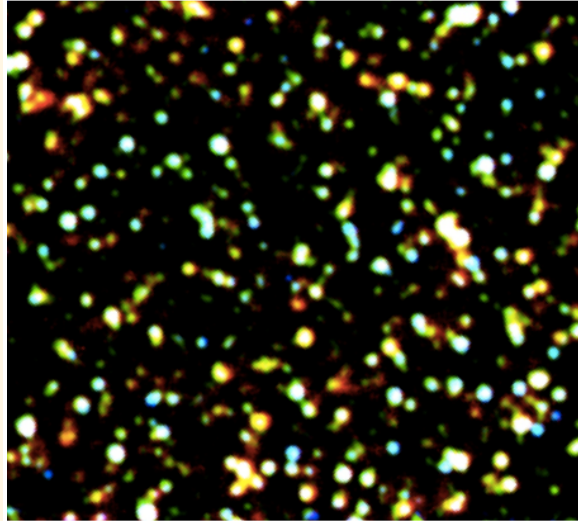
Instabilités dynamiques et morphogénèse des galaxies







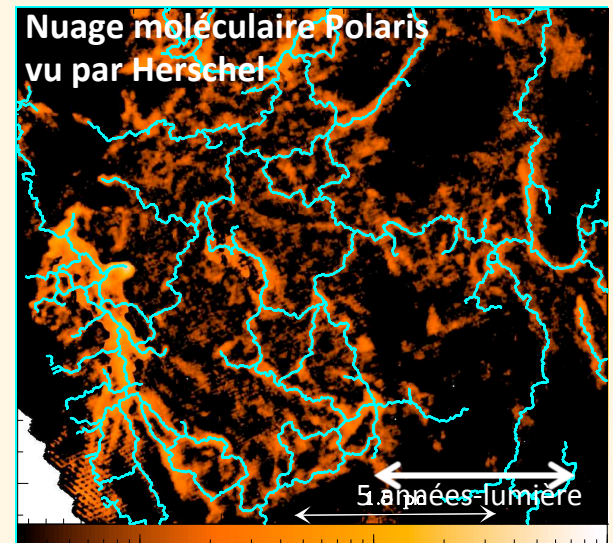
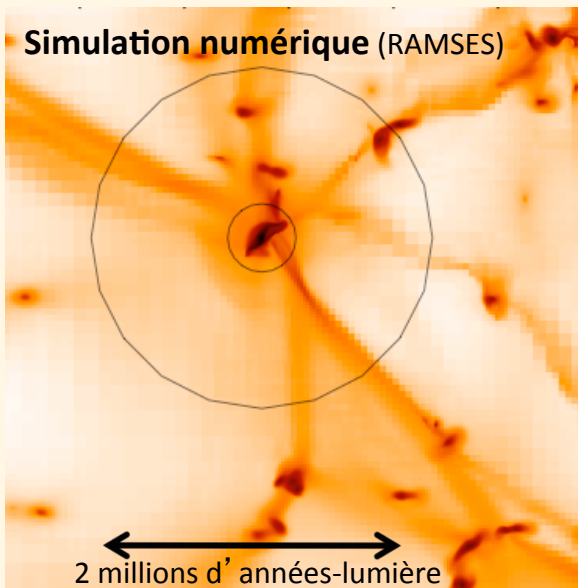
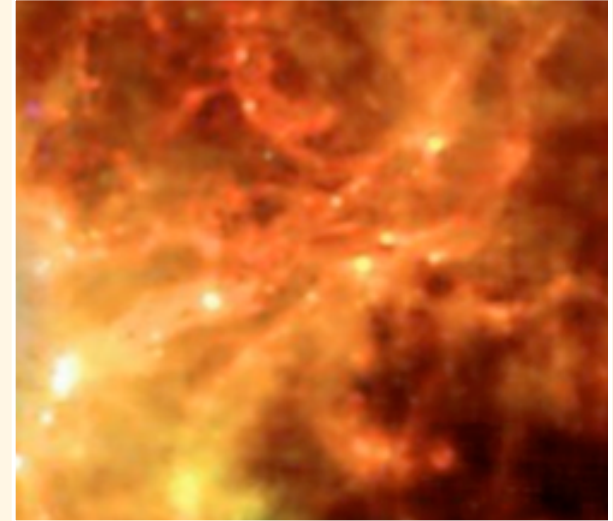
Échelle cosmologique
10 millions d' années-lumière



Galaxies
10 000 années-lumière



Régions de formation d' étoiles
10 années-lumière



The enigma of star formation in the Milky Way



Interstellar Gas and Star Creation

By

SIDNEY VAN DEN BERGH

(Eingegangen am 29. Juni 1957)

If no external supply is available, the gas in the solar vicinity will be exhausted about 700 million years from now

$\text{SFR(MW)} \sim 7,5 \text{ M}_{\odot}\text{yr}^{-1}$

(Diehl et al. 2006 Nature)

Molecular gas (H_2): $10^9 \text{ M}_{\odot}$

Neutral gas (HI): $5 \times 10^9 \text{ M}_{\odot}$

→ Gas refilled (e.g. infall, return gas fraction) = Van den Bergh (1957)

→ SFR reduced with reduced gas content: $\text{SFR} \sim \rho_{\text{gas}}$ = Schmidt (1959)

Grandes questions

- Quand et comment les galaxies ont-elles formé leurs étoiles ?
- Qui est né en premier: étoiles ou galaxies ou trous noirs supermassifs ?
- Quel est le rôle des fusions de galaxies, de l'environnement (groupes et amas de galaxies) ?
- Rôle des composantes sombres ? Matière/Energie/Baryons noirs
- Quelle source de rayonnement a provoqué la ré-ionisation de l'univers ?
- Pourquoi l'univers est-il globalement inefficace à former des étoiles ?
- Pourquoi la formation d'étoiles chute depuis $\sim 8-10$ Gyr ?
- Lien entre la formation d'étoiles et des trous noirs supermassifs ?
- Rôle de l'auto-régulation ? turbulence, feedback stellaire, supernovae,...