



UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Frédéric Daigne, Institut d'Astrophysique de Paris
Université Pierre et Marie Curie
Institut Universitaire de France

Université inter-âges
Paris-Sorbonne



Lundi 30 janvier 2012

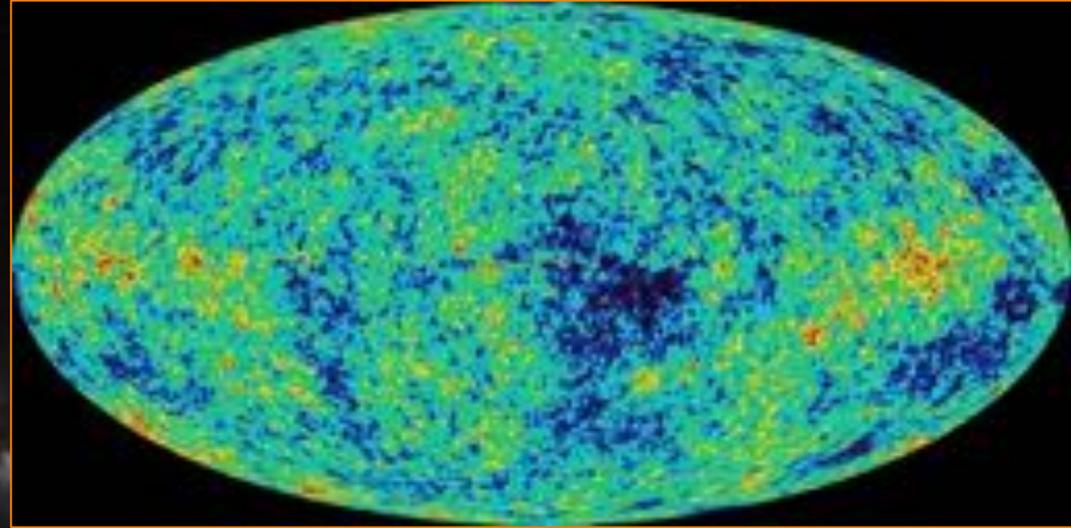
**11. La cosmologie moderne:
un Univers en évolution**

La cosmologie moderne: un Univers en évolution

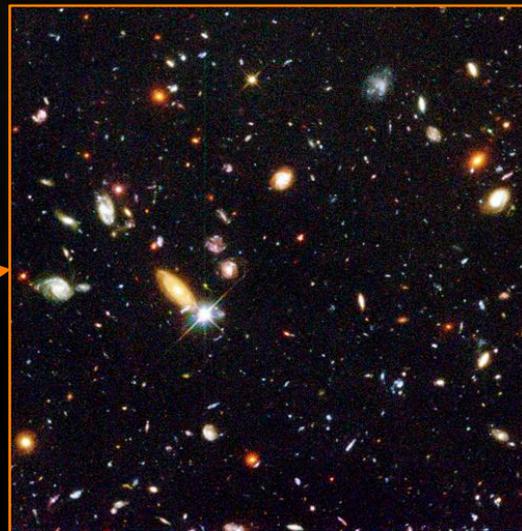
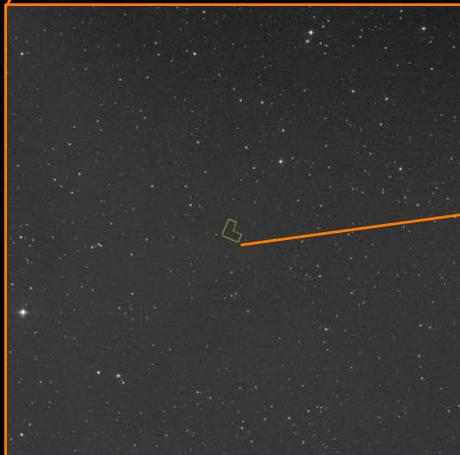


La cosmologie moderne: un Univers en évolution

Grande ourse



Le rayonnement fossile à 3 K (WMAP)



Le ciel profond de Hubble (HST) :
des milliers de galaxies jusqu'à quelques
milliards d'années lumière

La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

- Pendant longtemps, l'Univers se confond avec le système solaire – les récits cosmogoniques sont des récits de création de la terre, de la lune, du soleil, etc.
- Préhistoire et antiquité : vision essentiellement symbolique



La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

■ Le « miracle grec »



-Anaximandre (~ -580) : Univers infini et éternel,
Terre plate et isolée dans l'espace



-Pythagore (~ -550) : Mathématisation du cosmos
(naissance des sciences physiques ?)

-Anaximène de Milet : Etoiles fixées à d'immenses sphères de cristal
& Eudoxe (~ -500)

L'école d'Athènes – Raphaël, 1511
(Musées du Vatican)



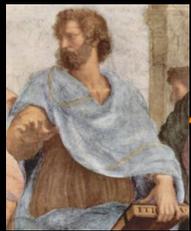
La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

Le « miracle grec »



- Platon (-428?/-348 ?) : (1) L'observation est inutile, seule la réflexion apporte la connaissance...
- (2) L'univers est parfait donc seuls le cercle et le mouvement uniforme sont acceptables...



- Aristote (-384/-322) : L'univers est divisé en deux régions :
 - le monde sublunaire (dont la Terre) où règnent le changement et l'imperfection ;
 - le monde des cieux, parfait et immuable.



L'école d'Athènes – Raphaël, 1511
(Musées du Vatican)

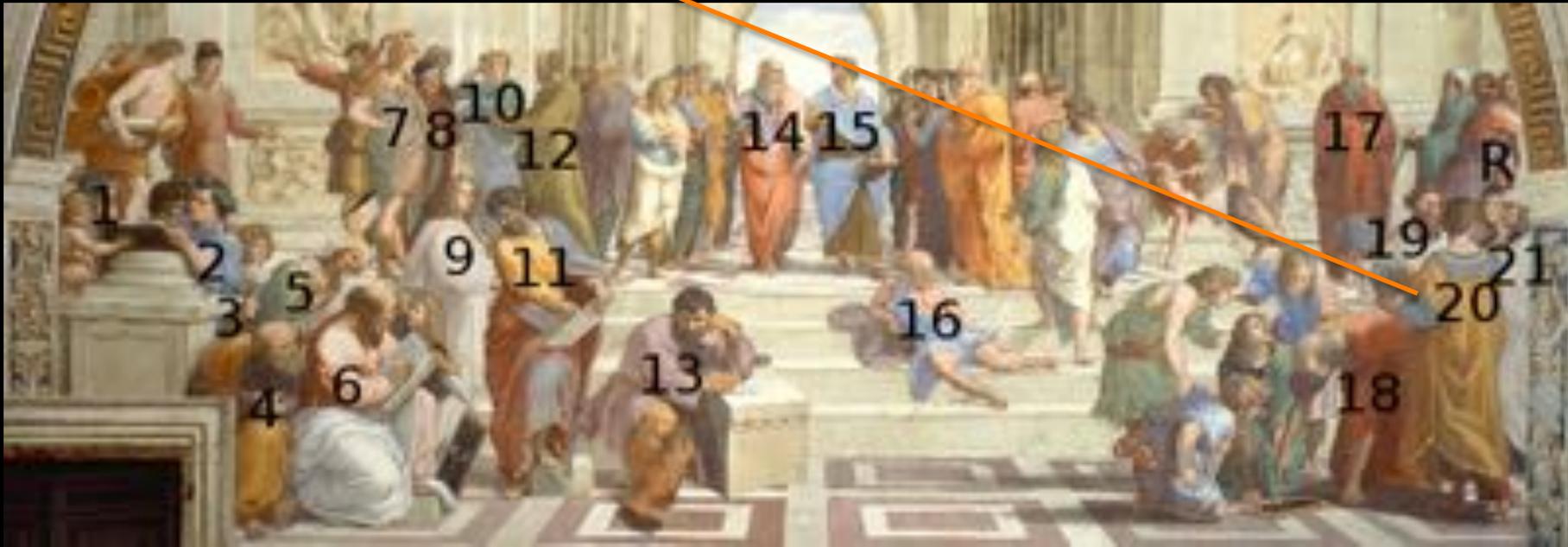
La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

■ Le « miracle grec »

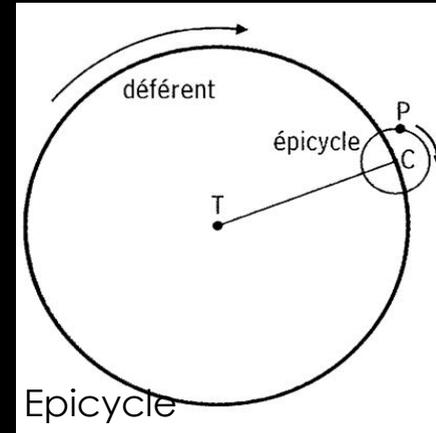
-Aristarque de Samos : Le système héliocentrique complet
(Alexandrie, ~ -300)

-Ptolémée : Apogée du système des épicycles
(Alexandrie, ~ 100-150) Système géocentrique avec une combinaison de 40 mouvements circulaires et uniformes

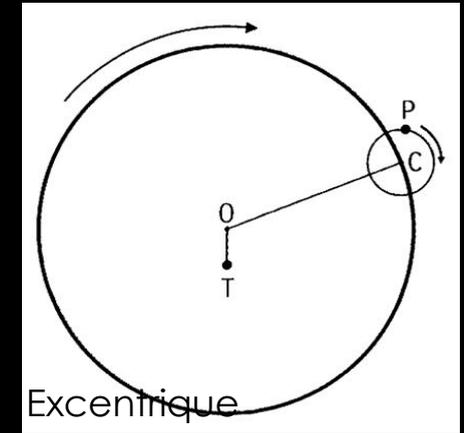


La cosmologie

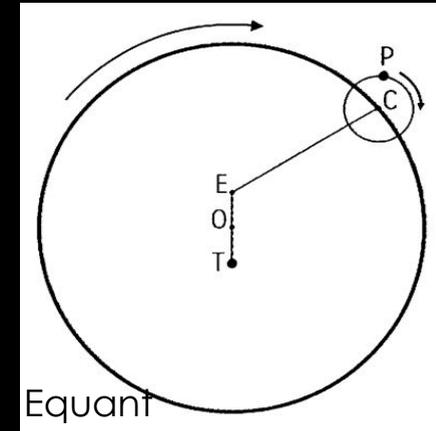
La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...



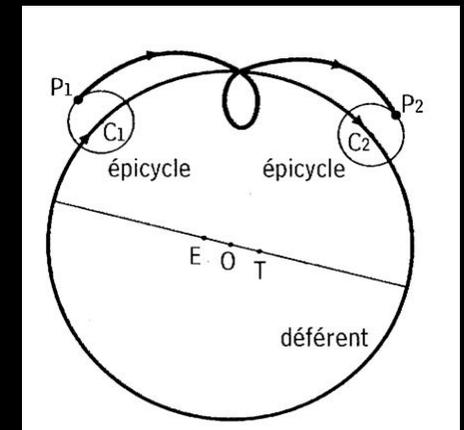
Epicycle



Excentrique



Equant



Ptolémée : « Il faut, autant qu'on le peut, adapter les hypothèses les plus simples aux mouvements célestes ; mais si elles ne suffisent pas, il faut en choisir d'autres qui les expliquent mieux » (Almageste, XII, 2).

La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

- De Ptolémée à la Renaissance :
 - La cosmologie officielle est le système des épicycles (géocentrique).
 - L'univers est fini et stationnaire (éternel, immuable).
 - Le système d'Aristote est le cadre d'interprétation obligé.
 - Pas de progrès notables.
 - Seuls les arabes cultivent encore l'héritage grec... Ils améliorent le système de Ptolémée, ils développent l'instrumentation (astrolabe), etc.



Astrolabe perse, XVIII^{ème} siècle

La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

La Renaissance et la naissance de la science moderne

- Copernic (1473-1543) :
Système héliocentrique

- Tycho Brahe (1546-1601) :
- Apogée de l'observation astronomique à l'œil nu
- Utilisation des observations de Tycho Brahe par Kepler pour obtenir ses 3 lois

- Galilée (1564-1642) : cf. cours n°1 & 3

- Première lunette astronomique

- Observations fondamentales :

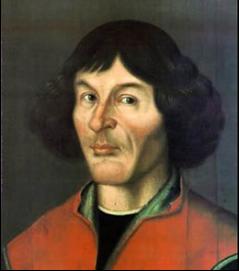
relief de la lune, satellites de Jupiter, taches solaires, phases de Vénus, etc.

⇒ abandon du système d'Aristote

⇒ abandon du système géocentrique

- Le principe d'inertie, la chute libre, le pendule...

⇒ naissance de la physique moderne fondée sur l'expérience



La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

■ La Renaissance et la naissance de la science moderne :



-Kepler (1571-1630) :

- Les trois lois (abandon du mouvement circulaire & uniforme)
- L'univers est fini (sinon la nuit est blanche : paradoxe d'Olbers)



-Newton (1643-1727) : cf. cours n°1 & 3

- Le père de la mécanique moderne (loi de la gravitation universelle, principe fondamental de la dynamique, ...)
- Calcul infinitésimal
- Contributions importantes à l'optique (télescope)
- L'univers est infini (sinon effondrement gravitationnel)

⇒ fondation de la physique classique, avec son « axiomatique » (*Principia*) et ses lois mathématiques

La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

▪ Les successeurs de Galilée et Newton :

- Picard (1620-1682) : Mesurent le système solaire (cf. cours n°1)
Cassini (1625-1673)
Richer (1630-1696)
- Römer (1644-1710) : Vitesse finie de la lumière (cf. cours n°1)



Etablissement de l'Académie
des Sciences et Fondation de
l'Observatoire de Paris – 1666,
Testelin d'après Le Brun

- Lagrange (1736-1813): Apogée du formalisme mathématique de
& Laplace (1749-1827) la mécanique newtonienne
- Olbers (1758-1840) : Célèbre paradoxe
« Dans un univers transparent, statique et éternel, le ciel devrait
être uniformément brillant... »

La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

- Les successeurs de Galilée et Newton :



- Bessel (1784-1846) :

- Mesure la distance d'une étoile par parallaxe (cf. cours n°1)

- Fraunhofer (1787-1886) :

- La spectroscopie (cf. cours n°2 & 3)

- Le Verrier (1811-1877) :

- Apogée de la mécanique céleste newtonienne (cf. cours n°1) : Neptune



La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

- La fin de la physique classique et la naissance de la physique moderne

- Le Verrier (1811-1877) :

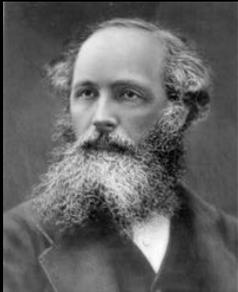
Déclin de la mécanique céleste newtonienne (cf. cours n°1) : l'avance du périhélie de Mercure
⇒ annonce la relativité générale



Fizeau

- Fizeau (1819-1896) :

- Effet Doppler-Fizeau (cf. cours n°5)
- Première mesure au laboratoire de la vitesse de la lumière



Maxwell

- Maxwell (1831-1879) :

- Les lois de l'électromagnétisme
- Les lois statistiques des gaz

- Rayleigh (1842-1919) :
& Jeans (1877-1946)

- Loi du corps noir (cf. cours n°2)
- « catastrophe ultraviolette »
⇒ annonce la mécanique quantique



Jeans

- Michelson (1852-1931) :
& Morley (1838-1923)

Echec de la mise en évidence expérimentale de l'éther
⇒ annonce la relativité restreinte

La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

- Discours de Lord Kelvin du 27 avril 1900 :

« deux petits nuages dans le ciel serein de la physique théorique »

-la catastrophe ultraviolette

-le problème de l'éther

On pourrait ajouter un 3^{ème} nuage : l'avance du périhélie de Mercure...

- Le XX^{ème} siècle : la mécanique quantique et la relativité

-Lorentz (1853-1928) :

-La transformation de Lorentz

& Poincaré (1854-1912)

-Examen critique de la mécanique classique



-Planck (1858-1947) :

-Naissance de la mécanique quantique
⇒ Solution de la catastrophe ultraviolette



-Einstein (1879-1955) :

-Relativité restreinte
⇒ Solution du problème de l'éther
-Relativité générale : cf. cours n°7
⇒ Solution du problème de Mercure

La cosmologie

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : composition, structure, évolution, ...

- Dans la première moitié du XX^{ème} siècle est élaboré le cadre théorique pour la cosmologie moderne. Il reste à construire par l'observation une représentation réaliste de l'Univers, et pour cela, il faut dater et mesurer...

- La question de l'âge du système solaire : cf. cours n°2

- Becquerel (1852-1908) : Découverte de la radioactivité
- Holmes (1890-1965) : Le système solaire est âgé de 1,6 Gyr
- Patterson (1922-1995) : Le système solaire est âgé de 4,5 Gyr

- La question de la place du Soleil et de la taille de la Voie Lactée : cf. cours n°9

- Slipher (1875-1969) : Effet Doppler des « nébuleuses »
- Leawitt (1868-1921) : Méthode des céphéides pour mesurer les distances
- Shapley (1885-1972) : Distance Soleil-Centre Galactique = dizaines de milliers d'a.l.
- Hubble (1889-1953) :
 - Observations de céphéides dans les « nébuleuses spirales »
 - Il y a d'autres galaxies
 - Leurs distances se comptent en millions d'années lumière



Slipher

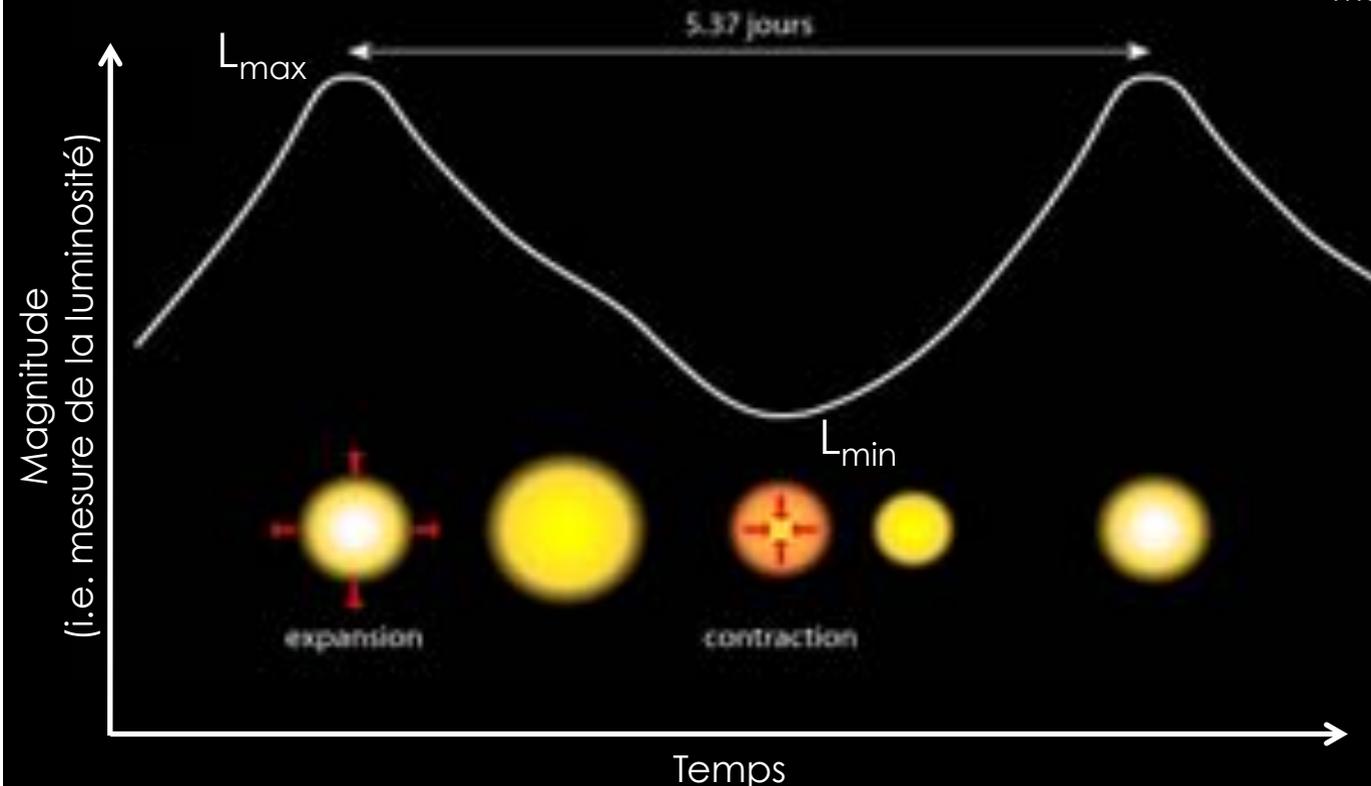


Shapley

La méthode des céphéides

La méthode des céphéides mise au point par Leavitt a permis de mesurer des distances beaucoup plus élevées que la méthode des parallaxes.

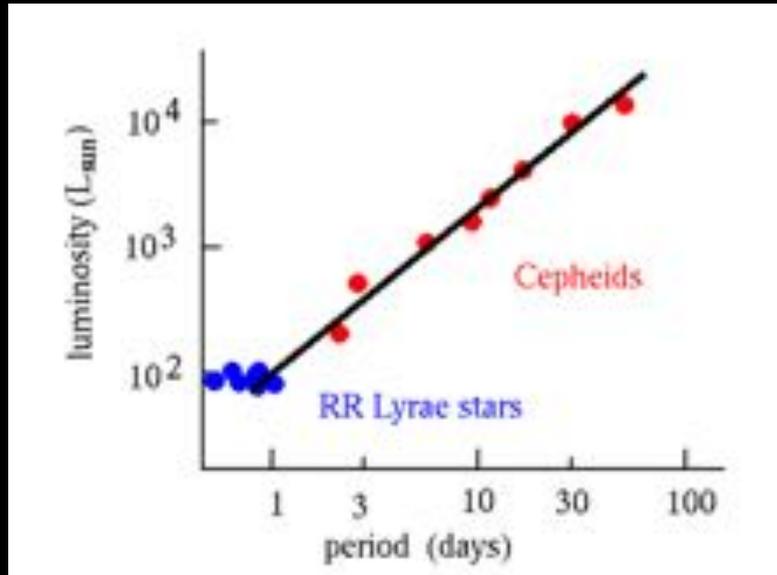
- Une céphéide est une étoile géante ou supergéante (cf. cours n°6) & variable
- La luminosité de ces étoiles varie de manière périodique (pulsation régulière de l'enveloppe extérieure)
- Le nom vient du prototype : δ Cephei
 - Période de 5,37 jours
 - Variation de $L_{\max} / L_{\min} = 1,9$



La méthode des céphéides

La méthode des céphéides mise au point par Leavitt a permis de mesurer des distances beaucoup plus élevées que la méthode des parallaxes.

- La méthode est fondée sur une propriété importante des céphéides : la luminosité moyenne augmente avec la période avec une loi simple



H. S. Leavitt (1868-1921)

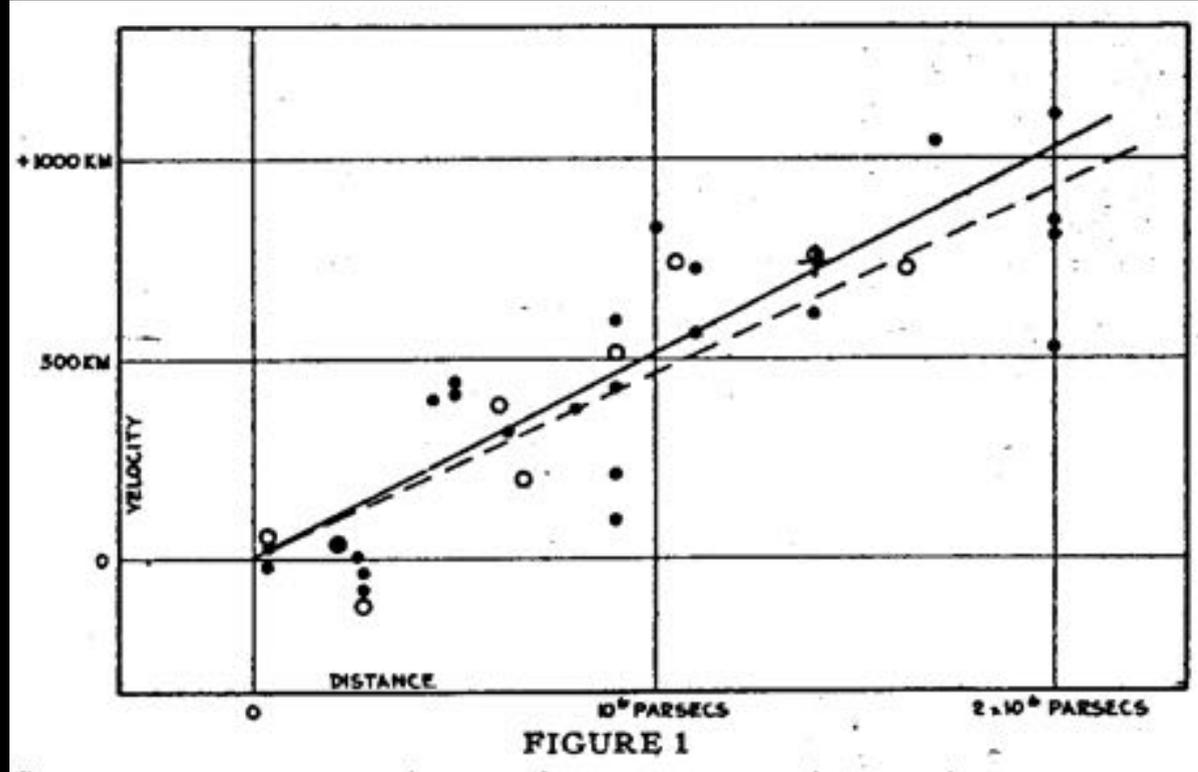
- La courbe a été étalonnée par Leavitt avec des céphéides proches dont la distance est mesurée par parallaxe
- Mesure de distance :
 - (1) on suit la céphéide sur une longue durée
 - (2) on déduit sa période et son flux moyen F (W/m^2)
 - (3) on déduit de la période la luminosité moyenne L (W)
 - (4) on déduit la distance à partir de $F = L / 4\pi D^2$

La découverte de l'expansion

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

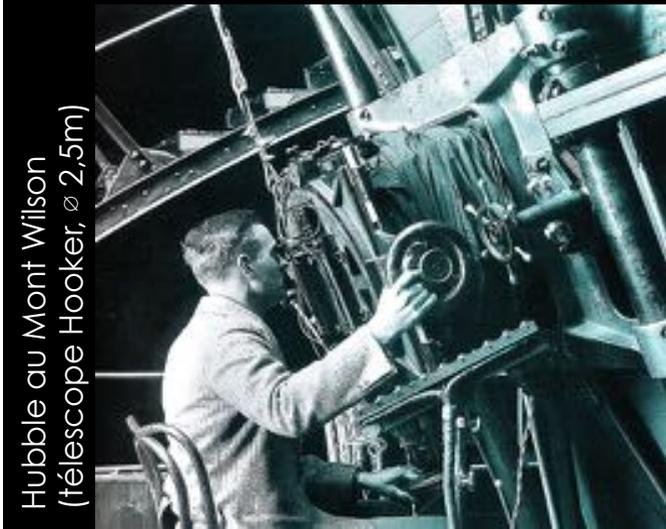
Vitesse de la galaxie
(mesurée par effet Doppler
avec la méthode de Slipher)

Unité : km/s



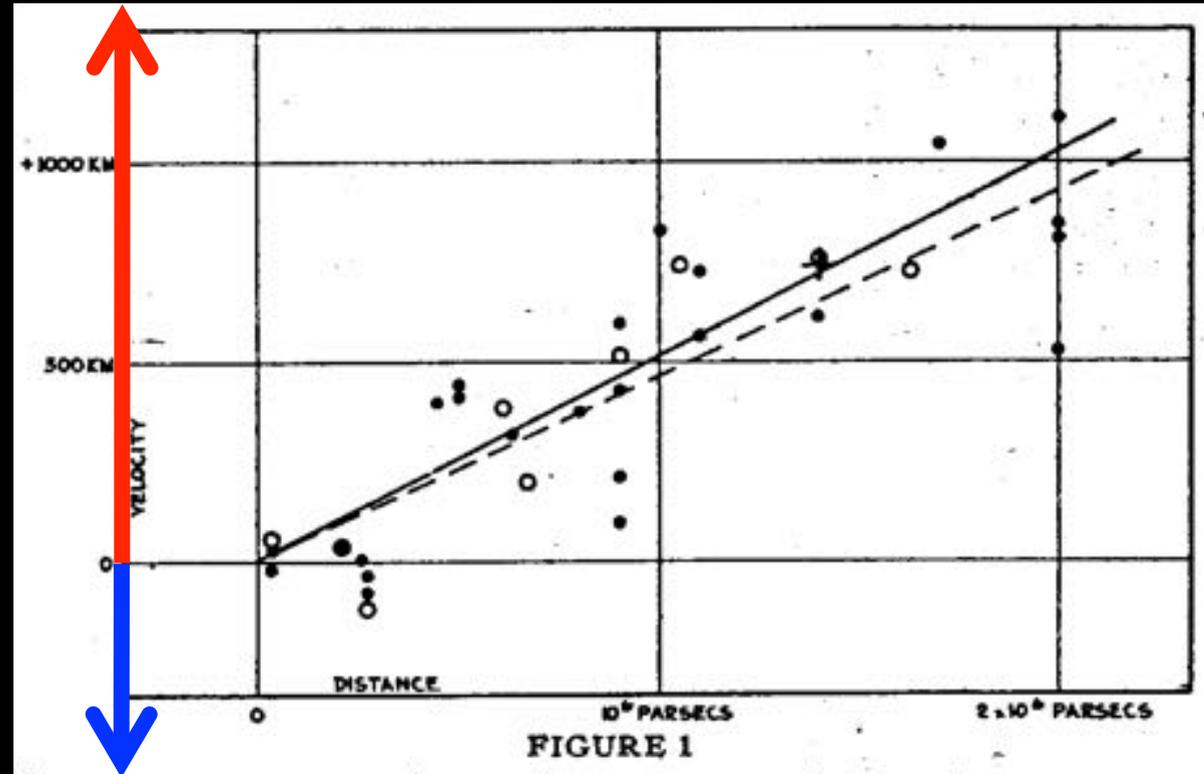
Distance de la galaxie
(mesurée par la méthode des céphéides de Leawitt)

Unité : 10^6 parsecs = 3,26 millions d'a.l.



La découverte de l'expansion

Décalage vers le rouge : la galaxie s'éloigne



Décalage vers le bleu : la galaxie se rapproche

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

■ Observation de Hubble :

- Les galaxies lointaines semblent toutes s'éloigner de nous (leur lumière subit un décalage vers le rouge : en anglais *redshift*)
- La vitesse d'éloignement augmente avec la distance selon la loi (dite désormais « loi de Hubble »)

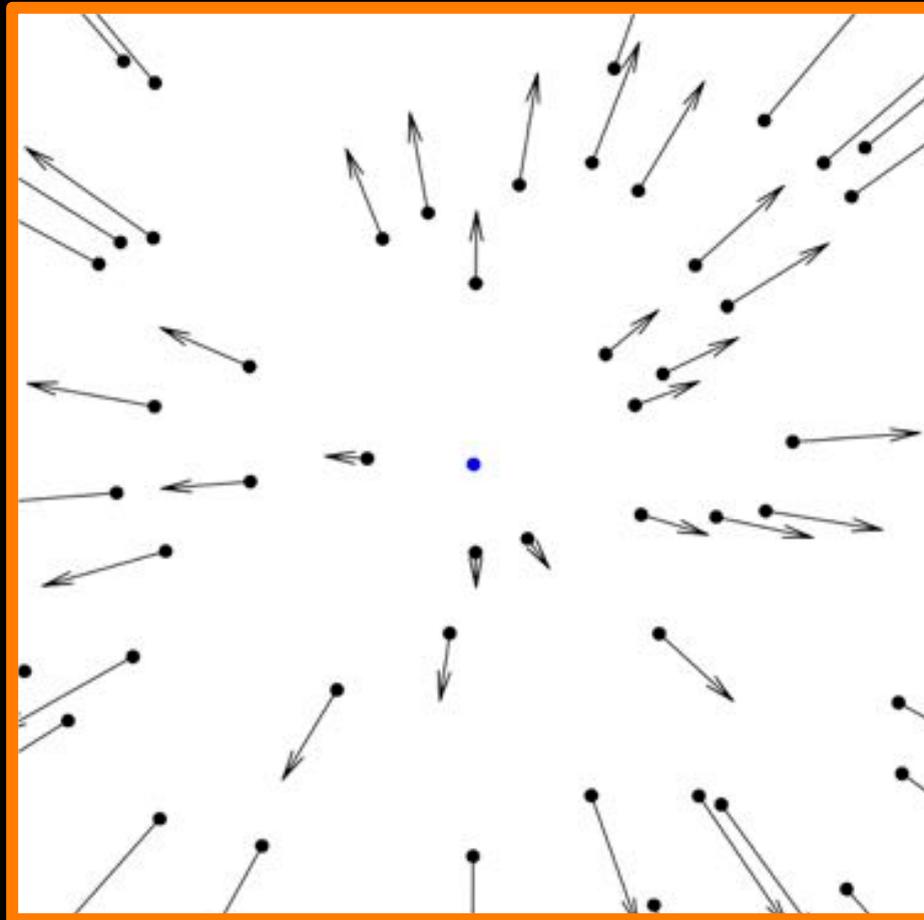
$$V = H_0 \times D$$

- La constante de proportionnalité s'appelle la constante de Hubble (unité : vitesse/distance = s^{-1} ; unité pratique : km/s/Mpc)

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

- La loi de Hubble semble nous donner une place privilégiée au centre : il n'en est rien. A cause de sa linéarité, il est facile de montrer qu'un observateur situé sur une autre galaxie voit la même loi de Hubble...



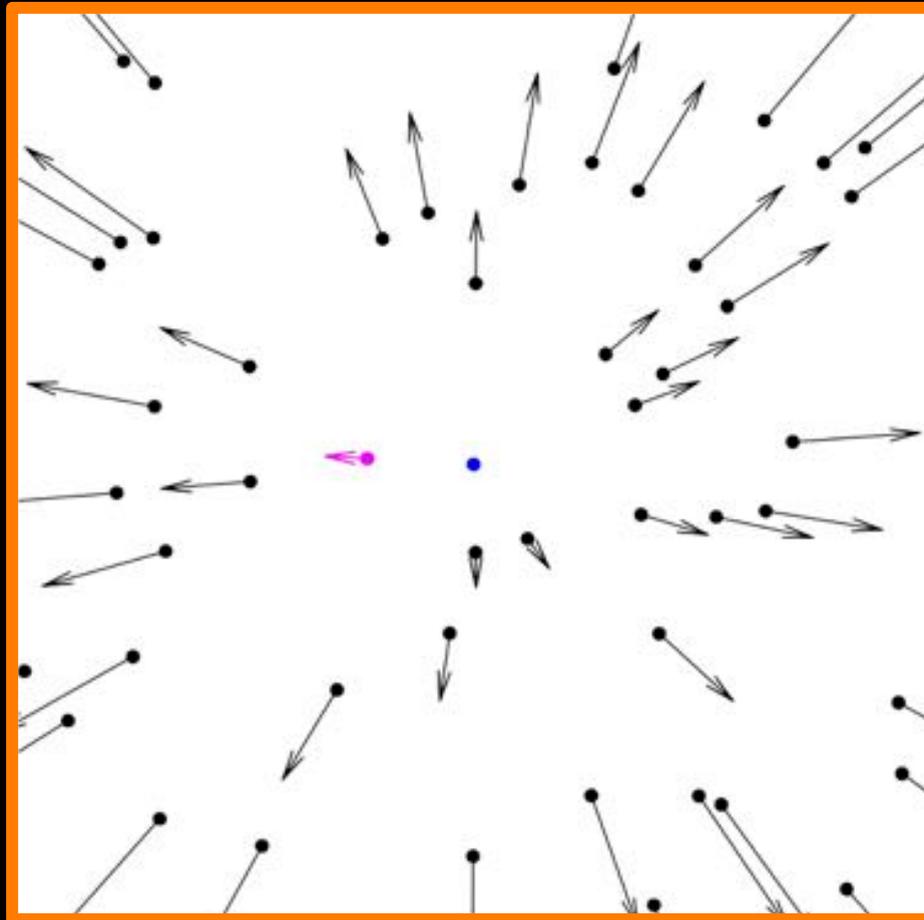
Expansion observée dans le référentiel de la galaxie bleue.

$$V = H_0 \times D$$

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

- La loi de Hubble semble nous donner une place privilégiée au centre : il n'en est rien. A cause de sa linéarité, il est facile de montrer qu'un observateur situé sur une autre galaxie voit la même loi de Hubble...

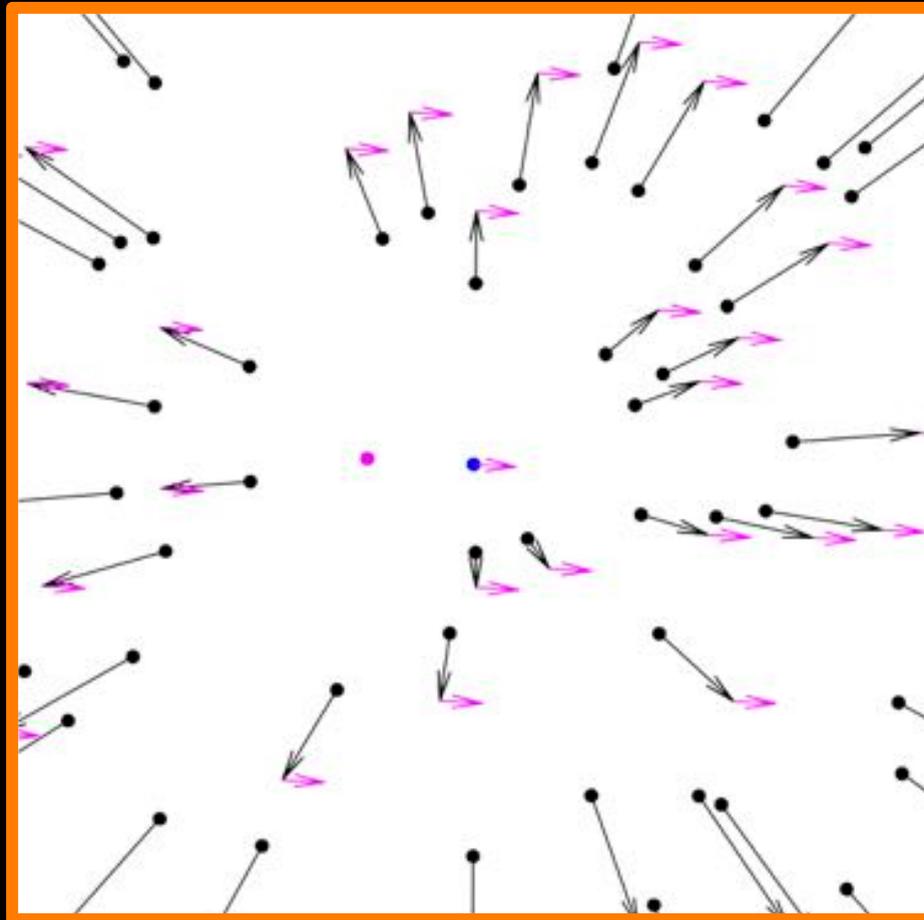


On sélectionne la galaxie rose qui s'éloigne de la bleue.

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

- La loi de Hubble semble nous donner une place privilégiée au centre : il n'en est rien. A cause de sa linéarité, il est facile de montrer qu'un observateur situé sur une autre galaxie voit la même loi de Hubble...

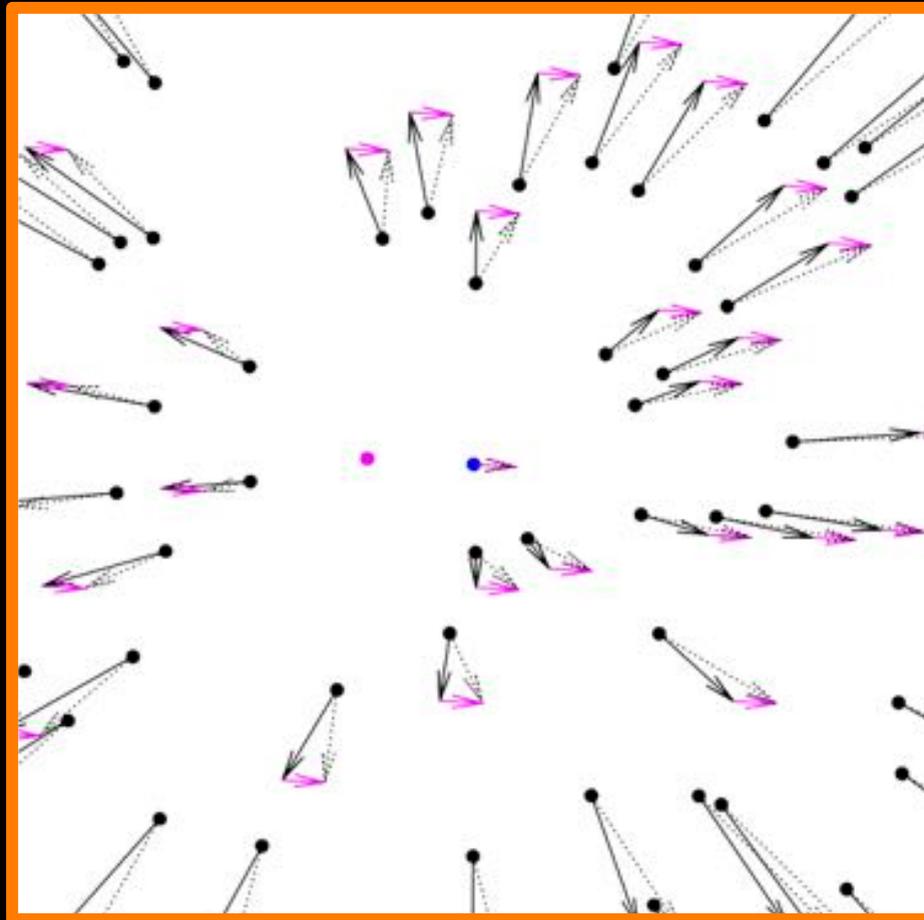


On compose les vitesses pour se placer dans le référentiel de la galaxie rose.

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

- La loi de Hubble semble nous donner une place privilégiée au centre : il n'en est rien. A cause de sa linéarité, il est facile de montrer qu'un observateur situé sur une autre galaxie voit la même loi de Hubble...

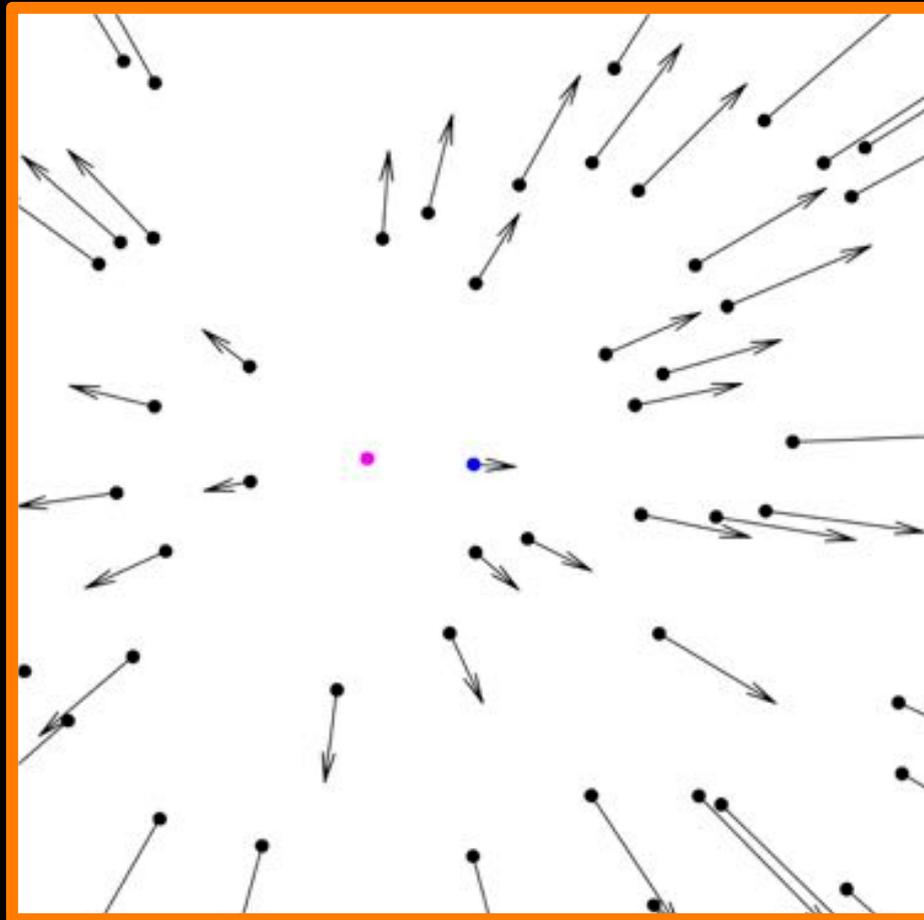


On compose les vitesses pour se placer dans le référentiel de la galaxie rose.

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

- La loi de Hubble semble nous donner une place privilégiée au centre : il n'en est rien. A cause de sa linéarité, il est facile de montrer qu'un observateur situé sur une autre galaxie voit la même loi de Hubble...



Expansion observée dans le référentiel de la galaxie rose.

$$V = H_0 \times D$$

-Même loi
-Même constante de Hubble.

L'expansion : âge de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

- L'expansion implique que les galaxies que nous observons aujourd'hui étaient plus proches dans le passé :

- l'Univers évolue

- l'Univers semble avoir un commencement ! Le *Big Bang*.

- L'analyse de la loi de Hubble permet de calculer l'ordre de grandeur de l'âge de l'Univers : le « temps de Hubble »

$$t_0 = 1/H_0$$

- Hubble mesure H_0 entre 460 et 510 km/s/Mpc
soit t_0 entre 1.9 et 2.1 milliards d'années

problème : on sait déjà à l'époque qu'il y a des étoiles plus âgées...

- A cause de ce désaccord, l'expansion n'est pas facilement acceptée dans la communauté scientifique de l'époque...

L'expansion : âge de l'Univers

La mise en évidence de l'expansion permet d'estimer l'âge de l'Univers.

- Le désaccord sur l'âge vient de la difficulté de la mesure. Hubble a sous-estimé les erreurs systématiques :

- la vitesse d'une galaxie donnée n'est pas donnée strictement par la loi de Hubble à cause des mouvements individuels des galaxies :

$$v = v_{\text{exp.}} + v_{\text{part.}} \text{ avec } v_{\text{exp.}} = H_0 \times D$$

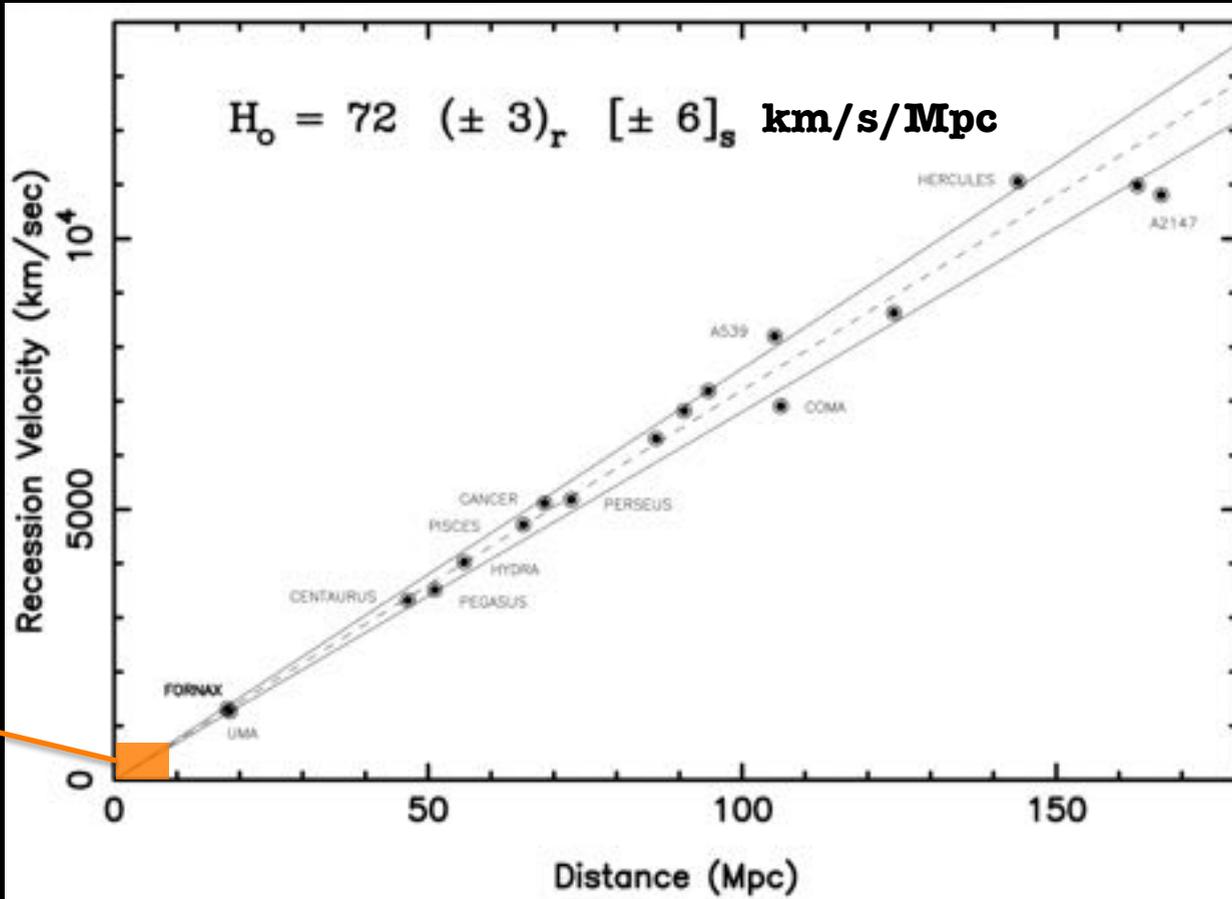
- galaxies proches :
D « facile » à mesurer car « petite »
 $v_{\text{exp.}}$ difficile à mesurer car petite & proche de $v_{\text{part.}}$
- galaxies lointaines :
D difficile à mesurer car grande
 $v_{\text{exp.}}$ facile à mesurer car grande ($\gg v_{\text{part.}}$)

- Il a fallu attendre les années 90 et le télescope Hubble pour pouvoir enfin mesurer H_0 précisément et lever la contradiction.

L'expansion de l'Univers

La mise en évidence de l'expansion permet d'estimer l'âge de l'Univers. Il faut pour cela une mesure précise de la constante de Hubble.

- Résultat du « Hubble Extragalactic Distance Key Project » (2000)



Région explorée
par E. Hubble en
1929

- L'âge de l'Univers est de l'ordre de $t_0 = 1/H_0 = 13,6$ milliards d'années, supérieur à l'âge des étoiles les plus vieilles...

L'expansion : l'horizon

Le fait que l'Univers a un âge implique l'existence d'un horizon observationnel.

- Cet « horizon de Hubble » correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

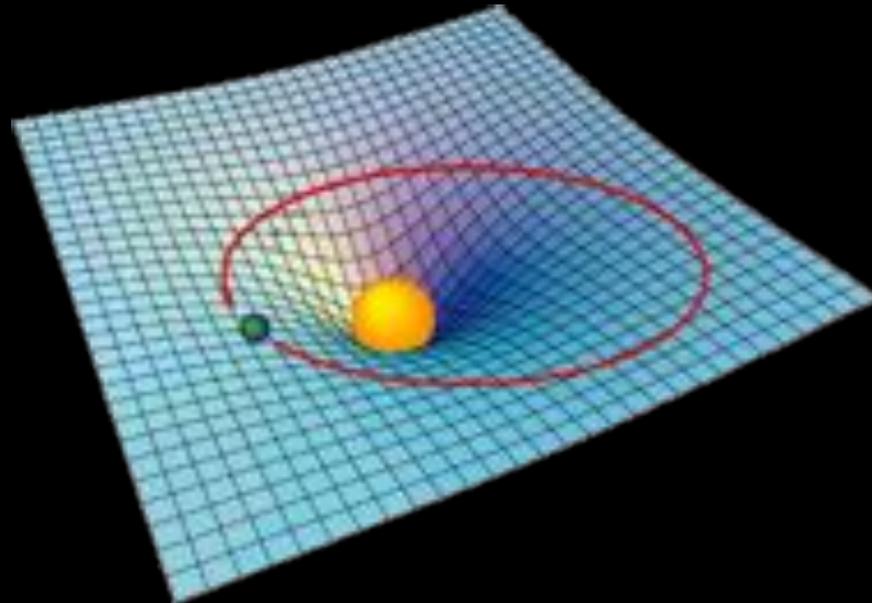
Comprendre l'expansion

L'expansion est une conséquence naturelle de la relativité générale.

- Rappel (cf. cours n°7) : en relativité générale, l'équation fondamentale s'écrit
évolution de la structure de l'espace temps
= fonction du contenu local en masse & énergie

(équation d'Einstein)

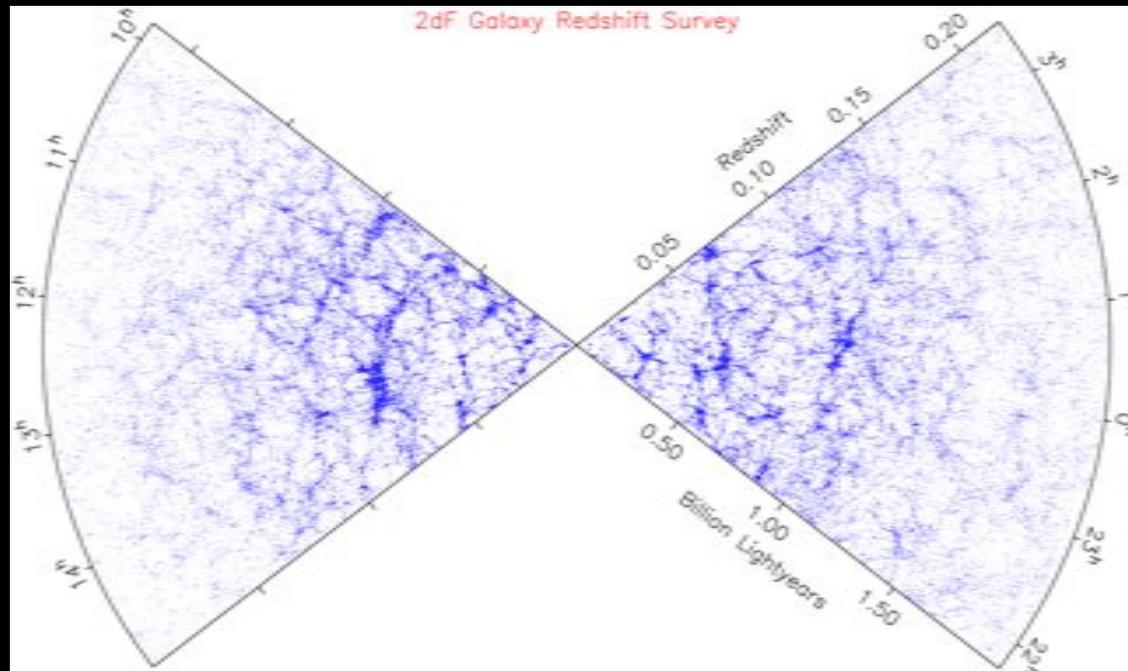
- La gravité se traduit par une propriété de l'espace-temps, qui est localement courbé par la présence de masse et d'énergie.



Comprendre l'expansion

L'expansion est une conséquence naturelle de la relativité générale.

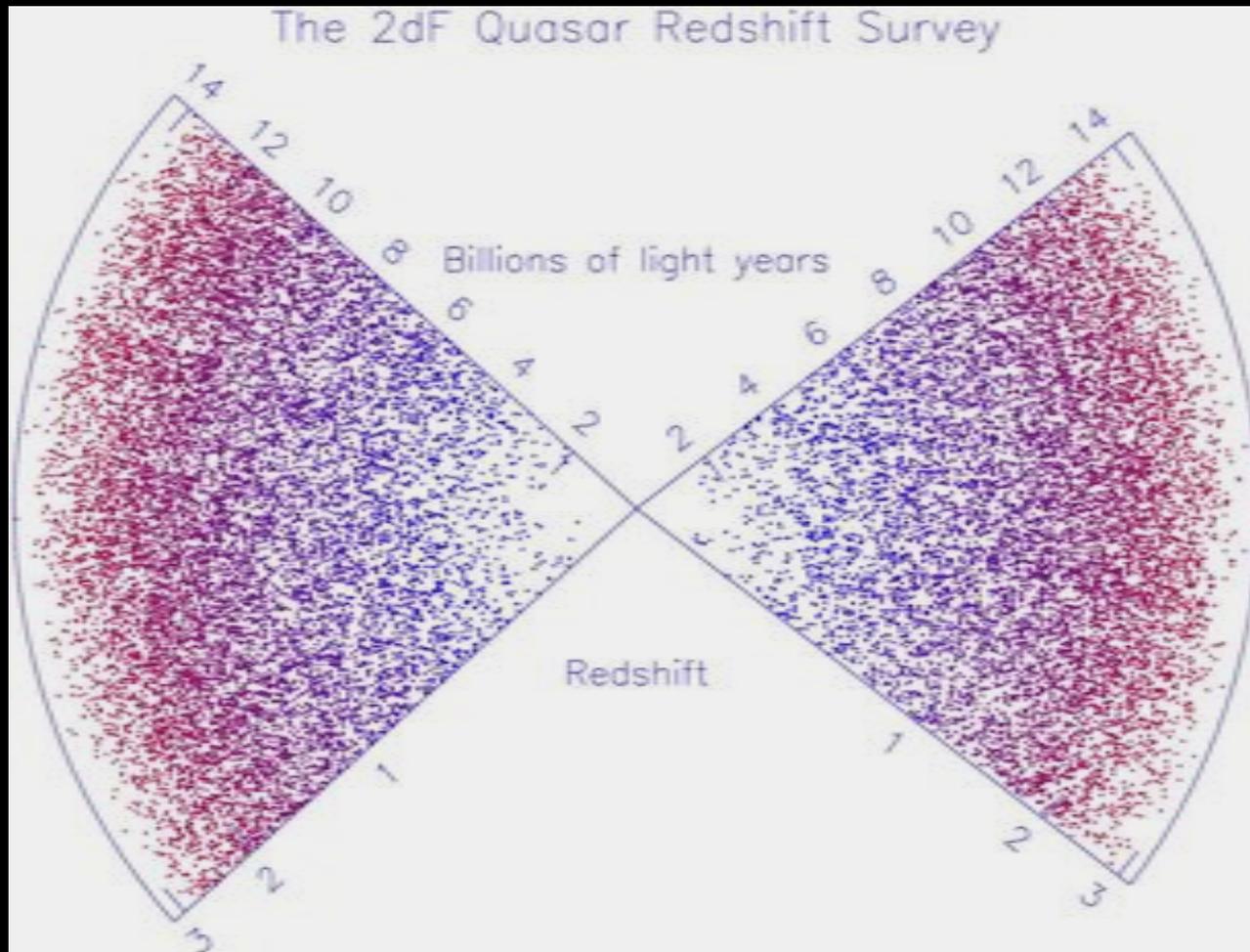
- On pose une hypothèse : le principe cosmologique
 - « L'Univers est homogène et isotrope à grande échelle »
- Ce principe est assez bien confirmé par les observations des quasars lointains



Comprendre l'expansion

L'expansion est une conséquence naturelle de la relativité générale.

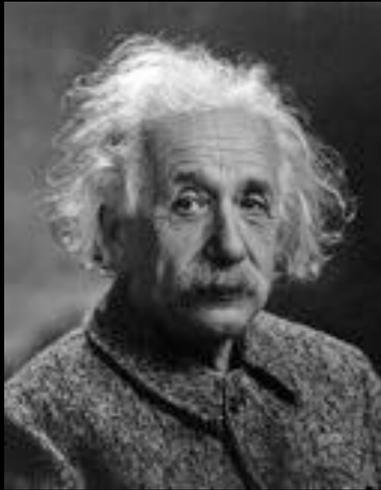
- On pose une hypothèse : le principe cosmologique
 - « L'Univers est homogène et isotrope à grande échelle »
- Ce principe est assez bien confirmé par les observations des quasars lointains



Comprendre l'expansion

L'expansion est une conséquence naturelle de la relativité générale.

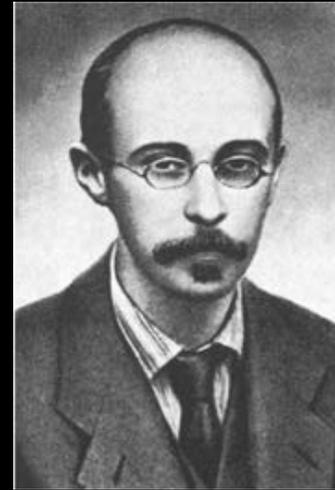
- Avec cette unique hypothèse, on trouve naturellement que les solutions de la relativité générale sont des Univers en expansion !
- Les seuls paramètres pour calculer cette expansion et son évolution correspondent au contenu actuel de l'Univers (masse + énergie).



A. Einstein (1879-1965)



W. De Sitter (1872-1964)



A. Friedman (1888-1925)



G. Lemaître (1894-1966)

Comprendre l'expansion

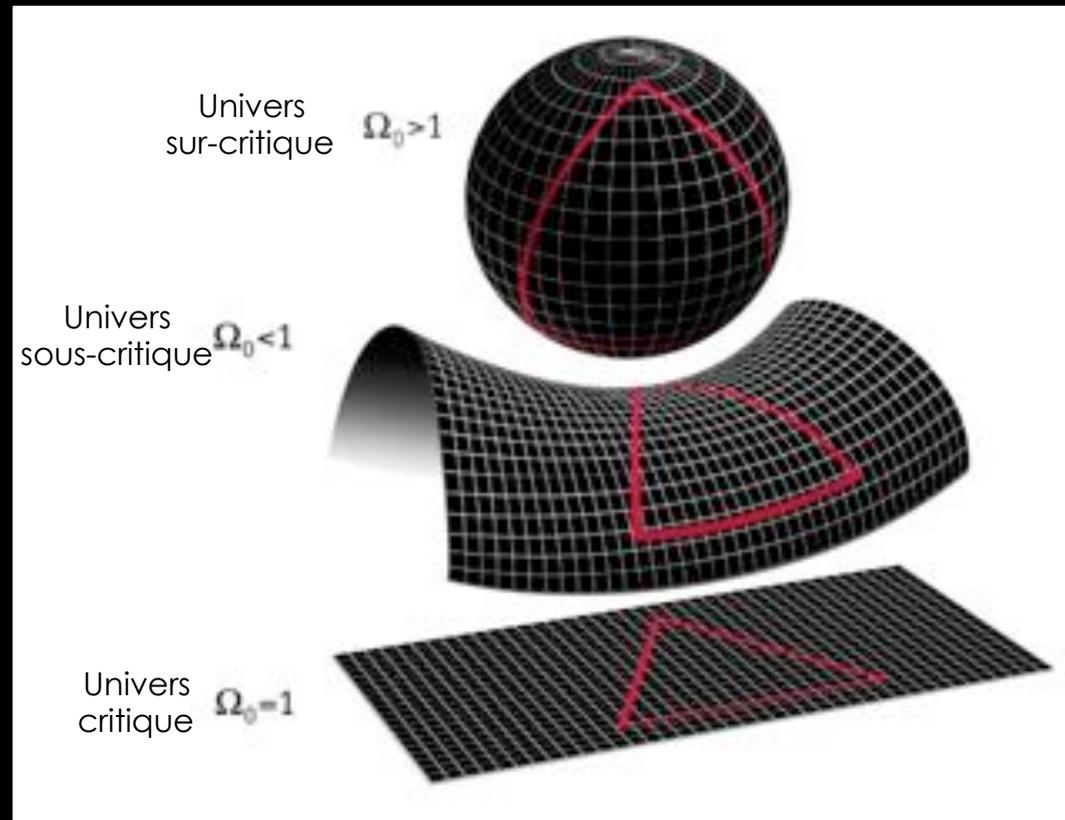
L'expansion est une conséquence naturelle de la relativité générale.

■ Il existe une densité critique qui sépare des Univers avec des propriétés assez différentes :

– Univers sur-critique : Univers fermé, à courbure positive, fini mais sans bord. L'expansion finit par s'arrêter et l'Univers se contracte...

– Univers critique : Univers ouvert, à courbure nulle, infini. L'expansion ne s'arrête jamais.

– Univers sous-critique : Univers ouvert, à courbure négative, infini. L'expansion ne s'arrête jamais.

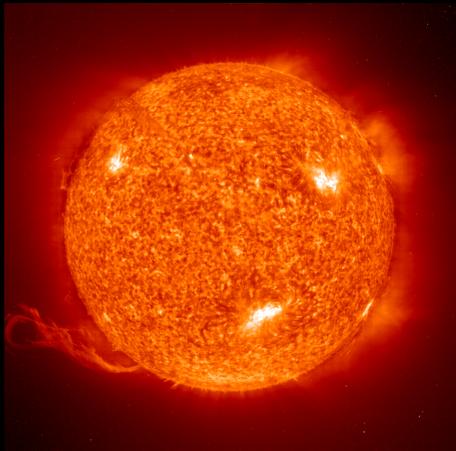


Le moteur de l'expansion

Pour construire un modèle précis de l'histoire de l'Univers, il faut avant tout connaître son contenu en matière & énergie. C'est une question délicate, tant du point de vue observationnel que théorique, qui fait apparaître deux problèmes majeurs.

On s'attend a priori à deux ingrédients :

- 1^{er} ingrédient : matière relativiste & énergie (neutrinos, rayons cosmiques, lumière ...)
Cette composante domine initialement, quand l'Univers est très chaud.
(*ère du rayonnement*). C'est la lumière (photons) l'ingrédient majoritaire.
- 2^{ème} ingrédient : la matière classique (étoiles, galaxies, gaz intergalactique, ...)
Cette composante domine quand l'Univers est moins chaud.
(*ère de la matière*).
- La transition s'effectue pour $T \sim 10\,000\text{ K}$, environ 70 000 ans après le Big Bang)



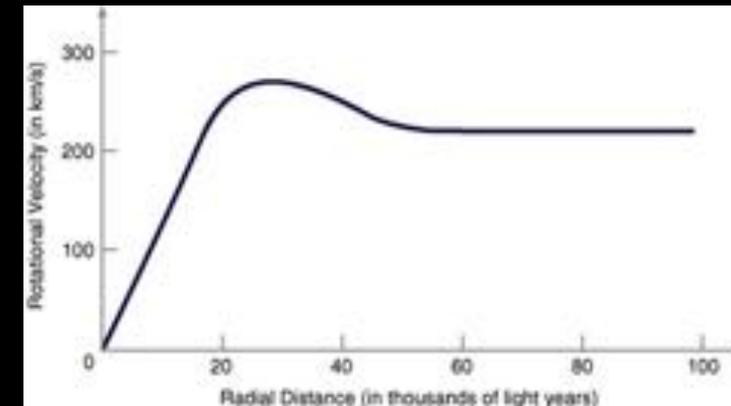
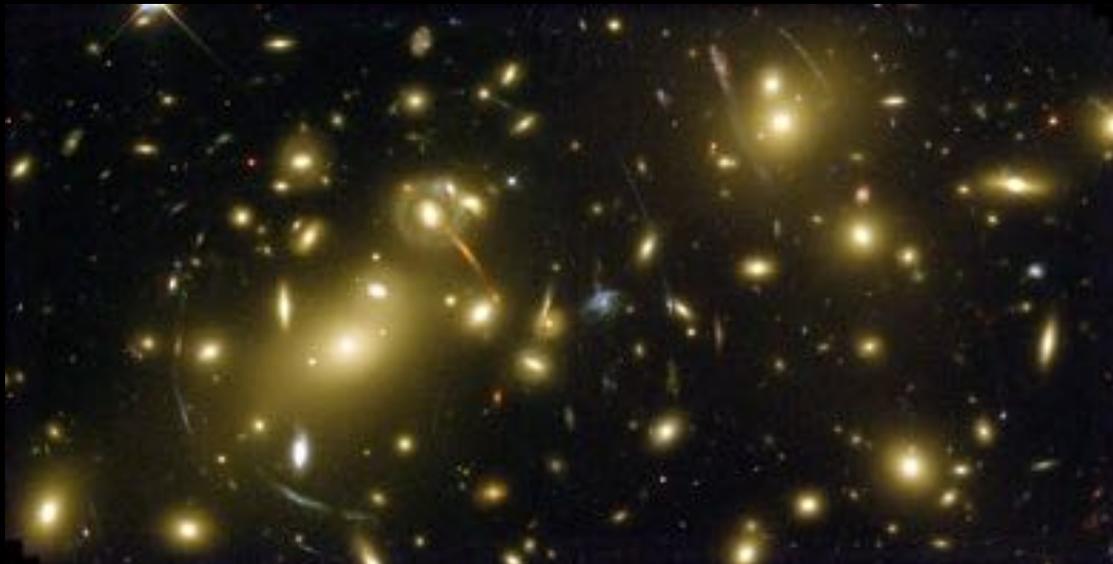
Le moteur de l'expansion

Pour construire un modèle précis de l'histoire de l'Univers, il faut avant tout connaître son contenu en matière & énergie. C'est une question délicate, tant du point de vue observationnel que théorique, qui fait apparaître deux problèmes majeurs.

- Premier problème : la matière noire.

Cf. cours n°9 et n°10.

Mises en évidence : rotation des étoiles dans les galaxies, des galaxies dans les amas, mirages gravitationnels, ...



Le moteur de l'expansion

Pour construire un modèle précis de l'histoire de l'Univers, il faut avant tout connaître son contenu en matière & énergie. C'est une question délicate, tant du point de vue observationnel que théorique, qui fait apparaître deux problèmes majeurs.

- Deuxième problème : l'énergie noire.

Les supernovae de type Ia (cf. cours n°7) sont de bonnes *chandelles standard* : elles ont toutes la même luminosité. On peut donc les utiliser pour mesurer des distances. De plus, comme elles sont très brillantes, la méthode des supernovae permet de mesurer des distances de l'ordre du milliard d'années lumière !

Dans les années 90, plusieurs collaborations ont mis à profit les supernovae de type Ia pour construire un diagramme de Hubble qui explore des distances plus lointaines que celui obtenu avec les céphéides.

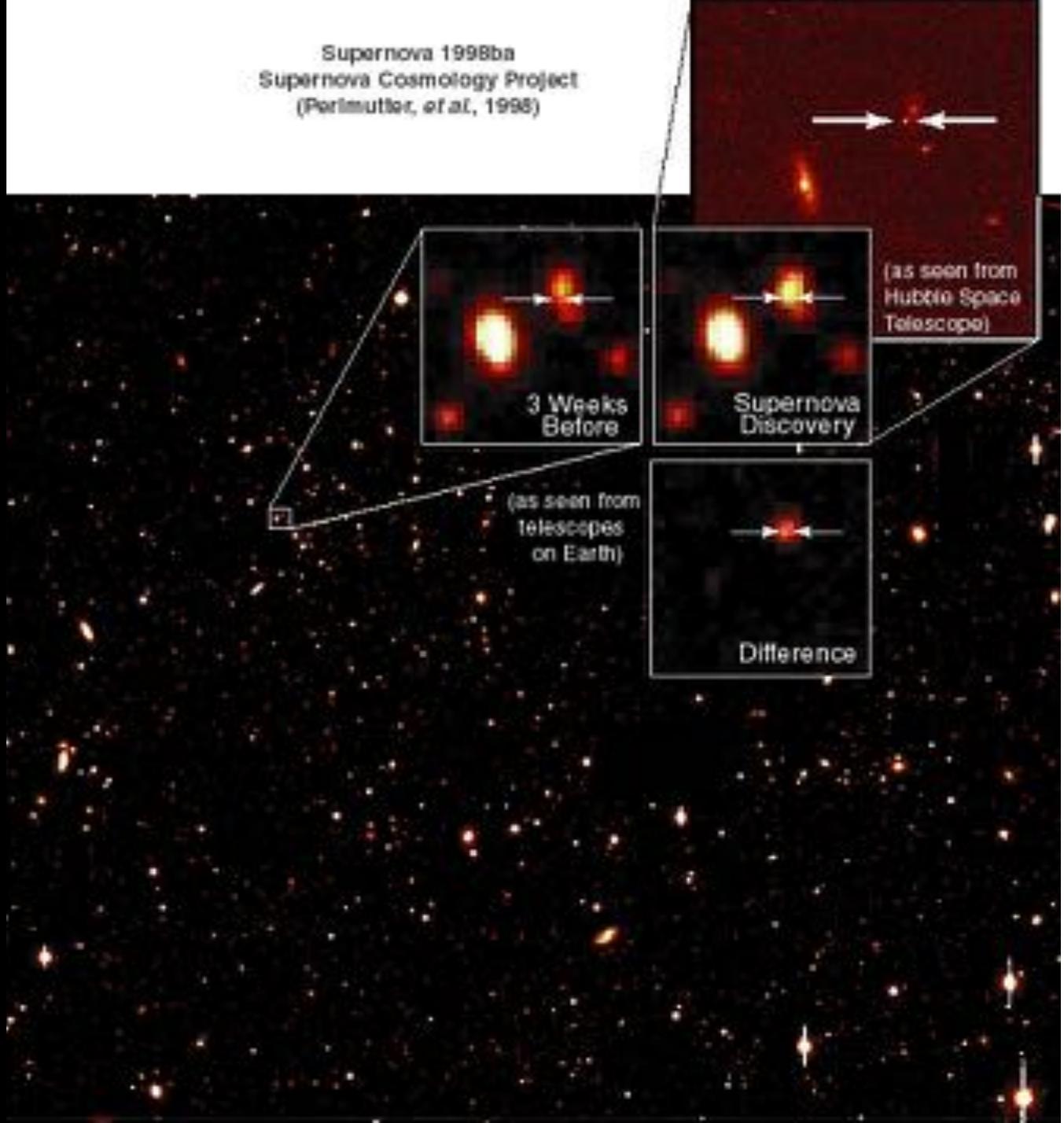
La méthode des supernovae de type Ia

1) Rechercher des supernovae de type Ia (=surveiller à intervalles fréquents un grande partie du ciel);

2) Mesurer le flux apparent, en déduire la distance;

3) Mesurer le décalage vers le rouge de la galaxie hôte de la supernova.

On peut alors tracer un *diagramme de Hubble*.

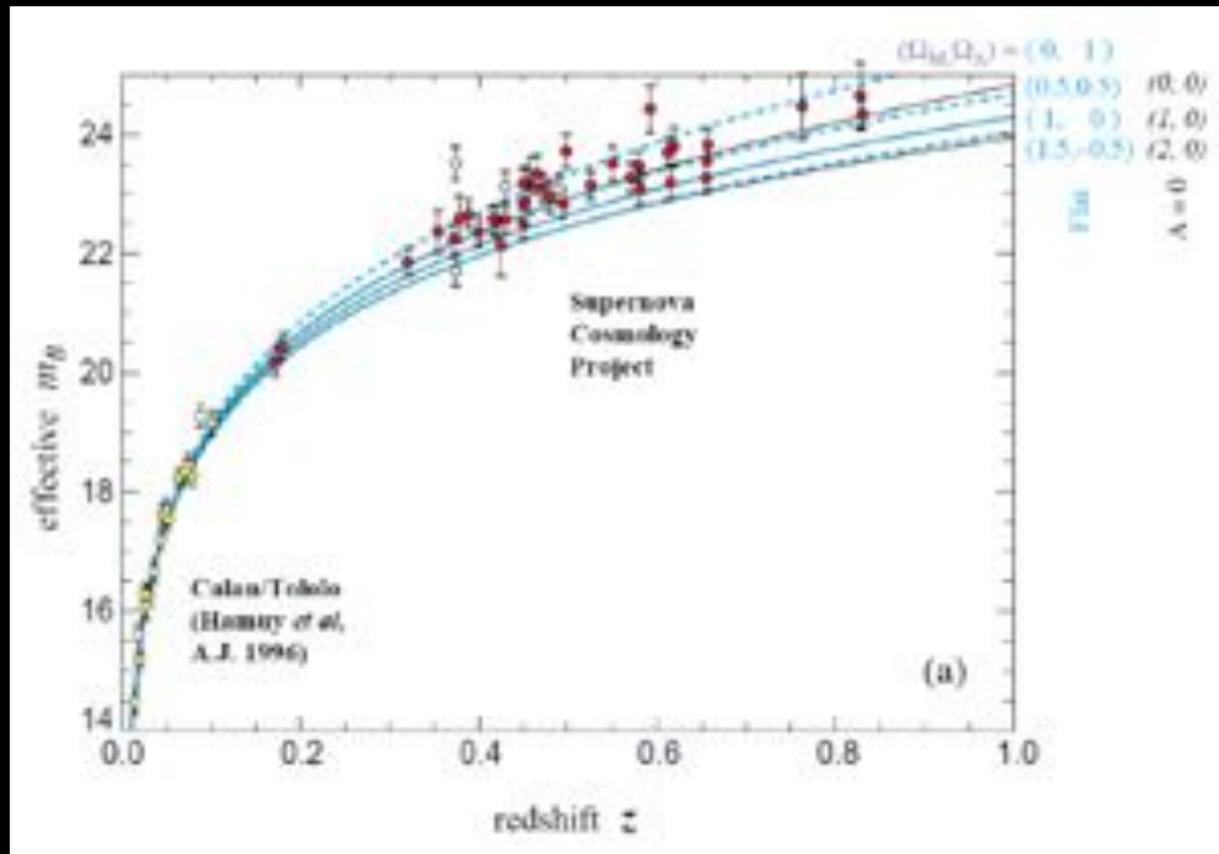


Le moteur de l'expansion

Pour construire un modèle précis de l'histoire de l'Univers, il faut avant tout connaître son contenu en matière & énergie. C'est une question délicate, tant du point de vue observationnel que théorique, qui fait apparaître deux problèmes majeurs.

- Deuxième problème : l'énergie noire.

Le diagramme de Hubble des supernovae de type Ia.



Le moteur de l'expansion

Pour construire un modèle précis de l'histoire de l'Univers, il faut avant tout connaître son contenu en matière & énergie. C'est une question délicate, tant du point de vue observationnel que théorique, qui fait apparaître deux problèmes majeurs.

- Deuxième problème : l'énergie noire.

Le diagramme de Hubble des supernovae de type Ia met en évidence une évolution inattendue de l'expansion : elle s'accélère au lieu de ralentir comme prévu pour un Univers dominé par la matière.

Pour reproduire cette observation, il faut introduire un ingrédient supplémentaire, de nature inconnue, baptisé *énergie noire*.

Les prix Nobel de l'astrophysique...

Prix Nobel de Physique 2011 :



« for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae »



Saul Perlmutter

(Supernova Cosmology Project)



Brian P. Schmidt & Adam G. Riess

(High-z Supernova Search Team)



Beaucoup de noir !

Le bilan des mesures de la composition actuelle de l'Univers, fondé sur des méthodes d'observation très différentes et indépendantes, est le suivant :

■ Densité actuelle de la matière & de l'énergie : 27 % de la valeur critique

Se décompose en

- Matière ordinaire visible : ~0,3 %

- Matière ordinaire noire : 4 %
(matière baryonique)

- Matière non-ordinaire noire : 23 %
(matière non baryonique)

- Énergie transportée par la matière relativiste : ~0,04 %
(principalement les neutrinos)

- Énergie transportée par la lumière : 0,005 %
(principalement le rayonnement fossile)

■ Densité actuelle d' « énergie noire » : 73 % de la valeur critique

■ Densité actuelle totale : ~100% de la valeur critique

Attention : plusieurs noirs

Le terme noir en astrophysique & cosmologie peut avoir des sens très différents.

Trous noirs, matière noire et énergie noire sont trois concepts très différents.

- Trou noir : noir parce que la lumière ne s'en échappe pas (présence d'un horizon des événements).
- Matière noire : noire parce qu'elle agit gravitationnellement mais qu'elle n'est pas visible.
- Énergie noire : idem.

Sortir du sombre...

Comprendre la nature de la matière noire et de l'énergie noire est un enjeu scientifique majeur, à l'interface entre l'astrophysique, la physique des particules et la physique théorique.

Les équations d'Einstein relient la structure de l'espace-temps à son contenu en masse et énergie. Il y a donc deux grandes pistes de recherche :

- 1^{ère} piste : la piste du contenu :

- La matière noire serait vraiment une matière présente dans l'Univers, ayant la propriété de n'interagir que peu ou pas avec la matière ordinaire, sauf gravitationnellement. On appelle ces particules des WIMPs (*weakly interacting massive particles*)

- Argument théorique : beaucoup de modèles de physique des particules au-delà du modèle standard prédisent l'existence de telles particules (super-symétrie par exemple).

- Recherche des WIMPs : recherche directe expérimentale (expériences Edelweis, LHC, ...) ou indirecte observationnelle (astronomie γ , ...).

- L'énergie noire serait également une énergie présente dans l'Univers. Il y a beaucoup moins de pistes à son sujet. On cherche actuellement à préciser ses propriétés.

Sortir du sombre...

Comprendre la nature de la matière noire et de l'énergie noire est un enjeu scientifique majeur, à l'interface entre l'astrophysique, la physique des particules et la physique théorique.

Les équations d'Einstein relient la structure de l'espace-temps à son contenu en masse et énergie. Il y a donc deux grandes pistes de recherche :

- 2^{ème} piste : la piste des équations :

- Le contenu n'est constitué que de ce qu'on connaît (ni matière noire, ni énergie noire) mais les équations de la gravité qui permettent d'en déduire la structure et l'évolution de l'espace-temps doivent être corrigées.

- Argument théorique : on sait que la théorie actuelle de la gravité, la relativité générale, n'est pas une théorie aboutie puisqu'elle n'inclut pas la mécanique quantique. De plus, il n'y a pas vraiment de tests de la relativité générale aux très grandes échelles.

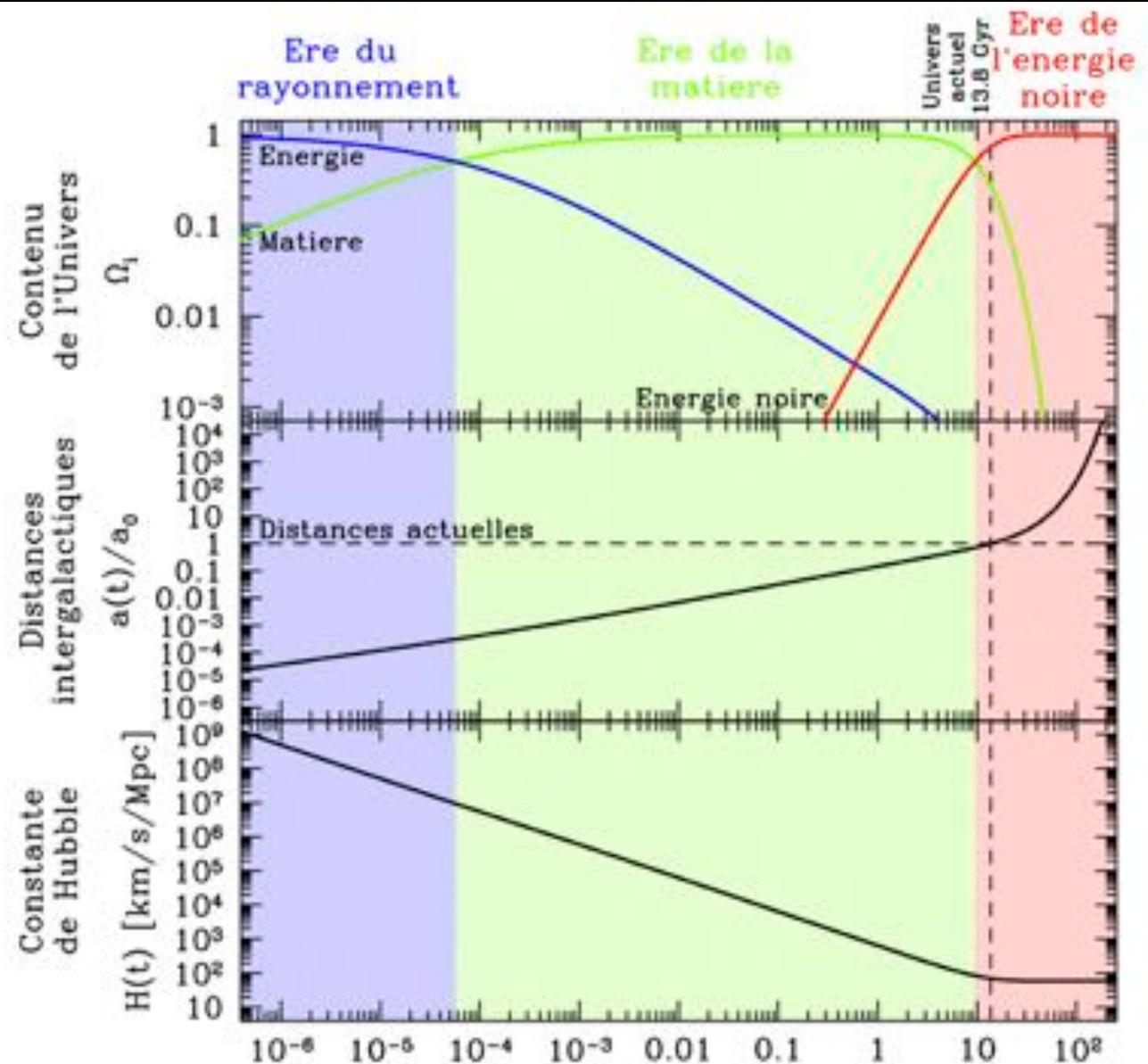
- Difficulté : la relativité générale est très bien testée aux échelles plus petites. Une nouvelle théorie de la gravité doit donc être très proche de la relativité générale pour des distances courtes, et s'en éloigner aux grandes échelles...

- Avantage : on peut envisager de résoudre le problème de la matière noire et celui de l'énergie noire en même temps !

Histoire de l'expansion

A partir de la composition de l'Univers mesurée aujourd'hui, on peut calculer l'histoire de l'expansion.

- L'âge actuel de l'Univers est 13,8 Gyr.
- Rappel : l'âge du système solaire est de 4,55 Gyr.



Comprendre l'expansion

En relativité générale, le décalage vers le rouge de la lumière n'est pas forcément dû à l'effet Doppler. Il peut être associé à un effet gravitationnel (effet Einstein), ou de manière générale à toute situation où la lumière ne se propage pas dans un espace-temps plat et statique.

- Exemples : au voisinage d'une étoile très dense, la lumière est décalée vers le rouge (effet observé avec les naines blanches, cf. cours n°7). Au voisinage de l'horizon d'un trou noir (cf. cours n°7), la lumière est de plus en plus décalée vers le rouge. A l'horizon du trou noir, ce décalage est infini.
- Les décalages vers le rouge mesurés par Hubble ne sont pas associés à un effet Doppler (pas de mouvement de la source), ni à un effet Einstein au sens habituel (l'effet n'est pas dû au champ gravitationnel de la galaxie qui émet la lumière observée) mais à une sorte d'effet Einstein associé à la dynamique de l'espace-temps dans son ensemble. On parle de *décalage vers le rouge cosmologique* pour distinguer cet effet des deux autres.
- Il ne s'agit donc pas d'un mouvement des galaxies mais d'une évolution de l'espace-temps : la « trame » à laquelle sont fixées les galaxies se dilate.
- Le fait que des vitesses apparentes de fuite supérieures à la vitesse de la lumière soient mesurées n'est pas en contradiction avec la relativité : ce n'est pas la vitesse de particules, mais la vitesse de « la trame d'espace-temps ».

Comprendre l'expansion

Trois analogies pour se faire une image mentale de l'expansion.

- Analogie 1 : le cake qui gonfle pendant la cuisson (image 3D).
 - La pâte joue le rôle de l'espace-temps
 - Les raisins secs sont les galaxies
 - La levure est le contenu en masse-énergie de l'Univers (i.e. le moteur de l'expansion).

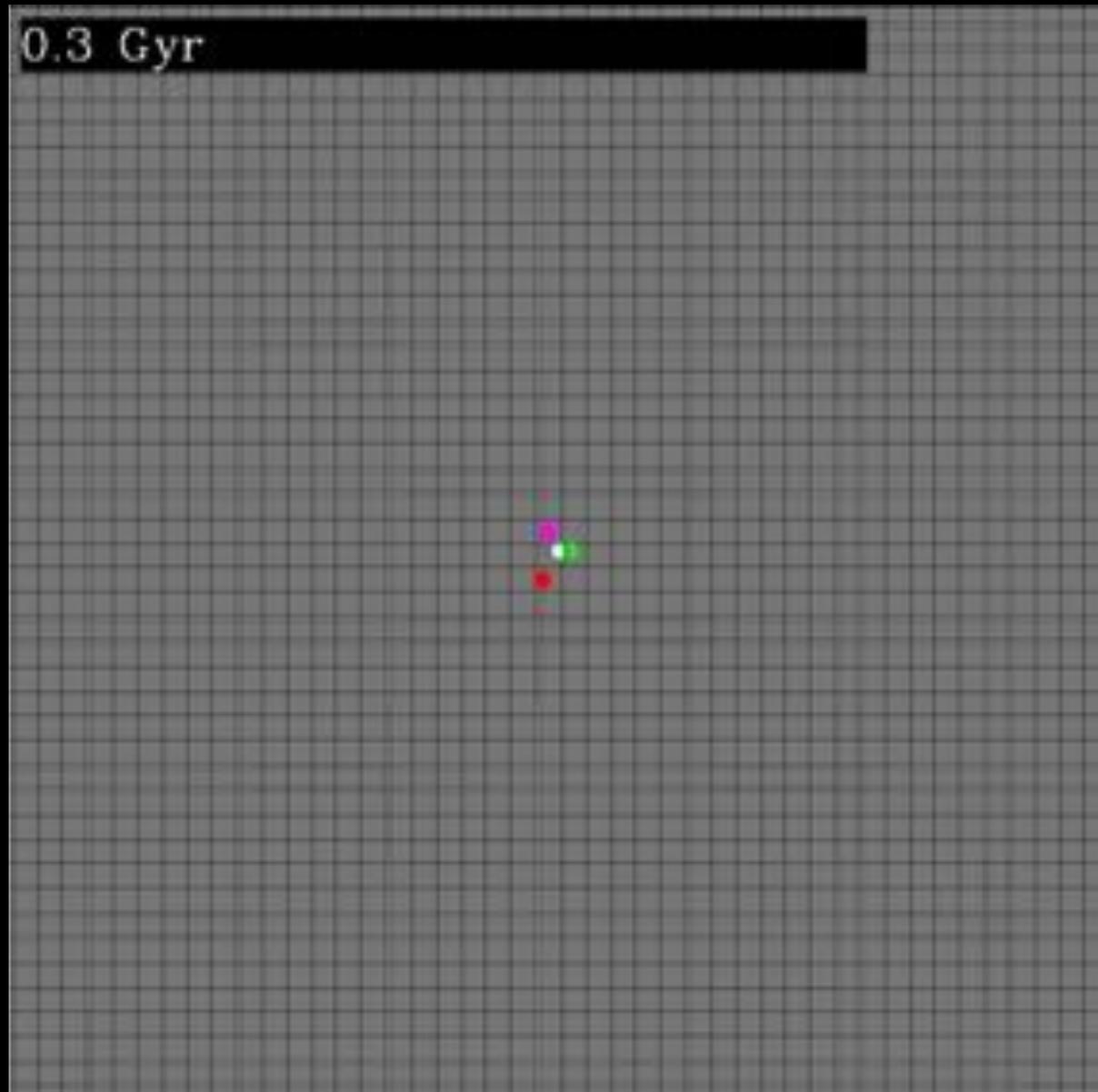


- Analogie 2 : le ballon de baudruche (image 2D) avec des points dessinés.
 - Le ballon joue le rôle de l'espace-temps
 - Les points sont les galaxies
 - La personne qui gonfle le ballon est le contenu en masse-énergie de l'Univers.
- Analogie 3 : comme l'analogie 2, en changeant les points par des fourmis : les galaxies ont un mouvement propre bien distinct de celui de l'expansion !

Comprendre l'expansion

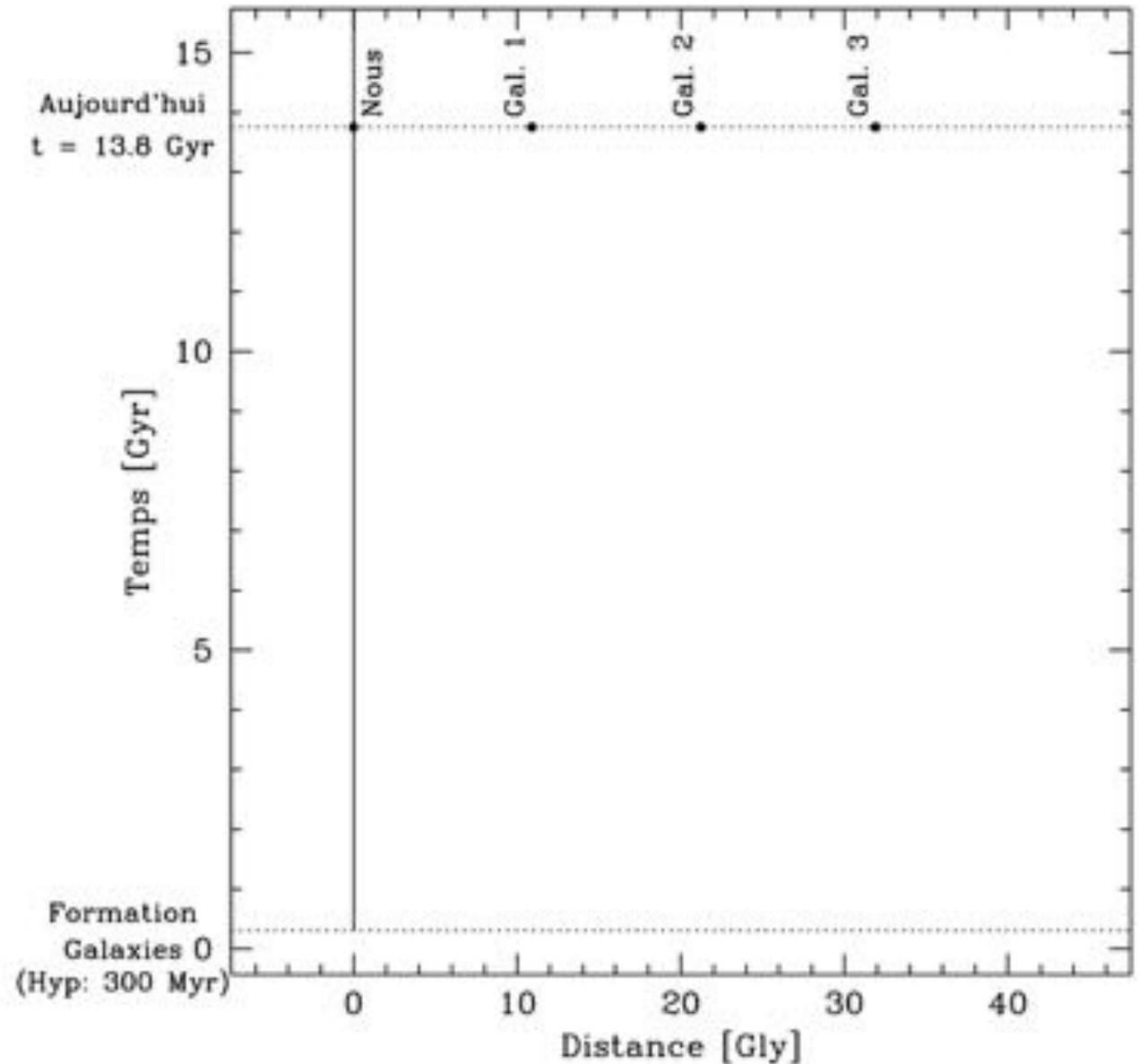
Une animation pour « visualiser » l'expansion et ses effets

- L'observateur (nous) est au centre de l'animation (point blanc)
- Une trame permet de visualiser l'expansion de l'espace-temps.
- Les trois galaxies n'ont pas de mouvement propre : elles s'éloignent de nous à cause de l'expansion
- Pour visualiser la propagation de la lumière, on suit les photons émis par les galaxies tous les 500 millions d'années
- Les trois galaxies entrent successivement dans l'horizon de l'observateur
- Effet de décalage vers le rouge : les cercles de photons concentriques sont de plus en plus séparés les uns des autres.



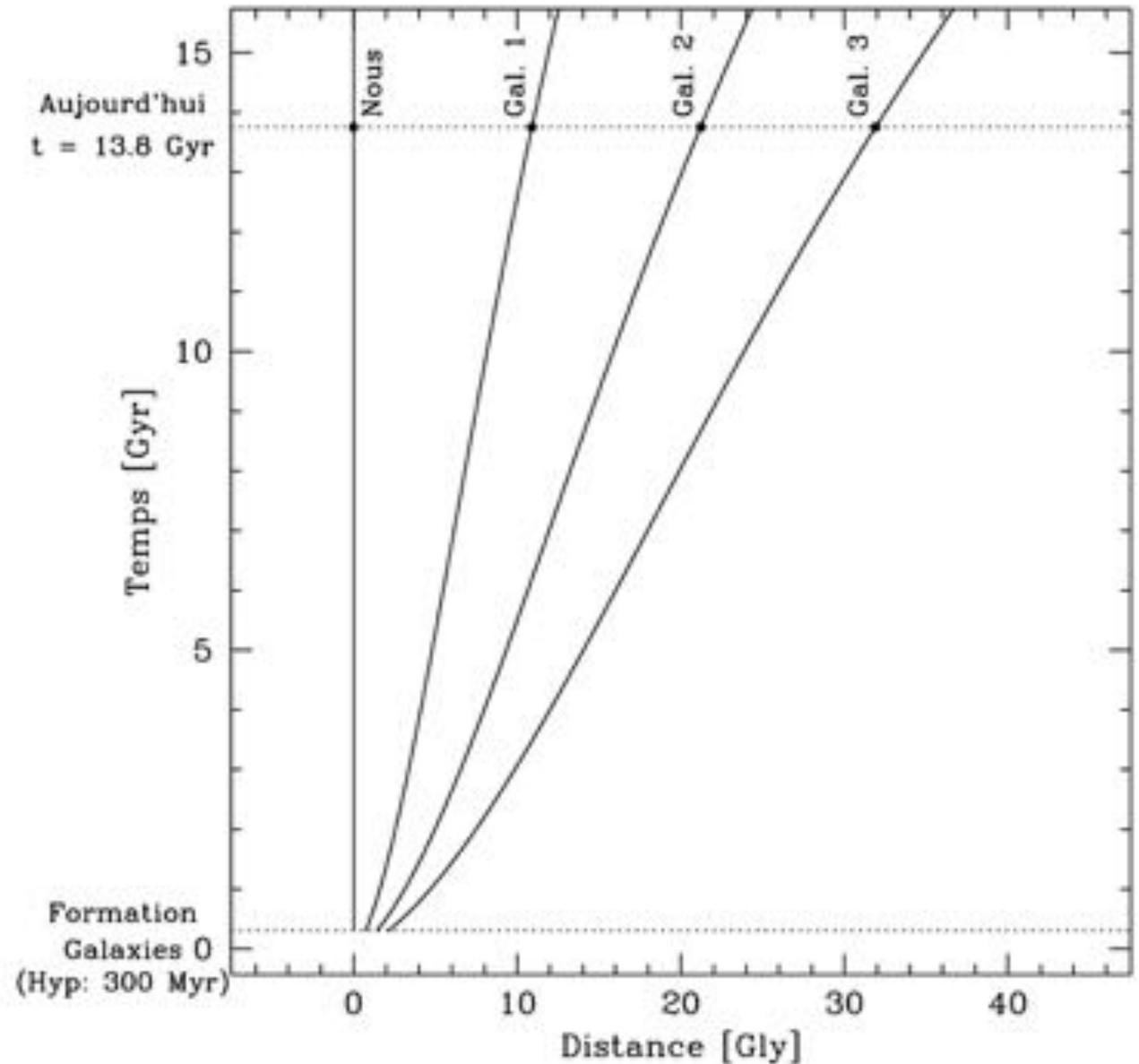
Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre ligne d'Univers



Voir loin, c'est voir dans le passé

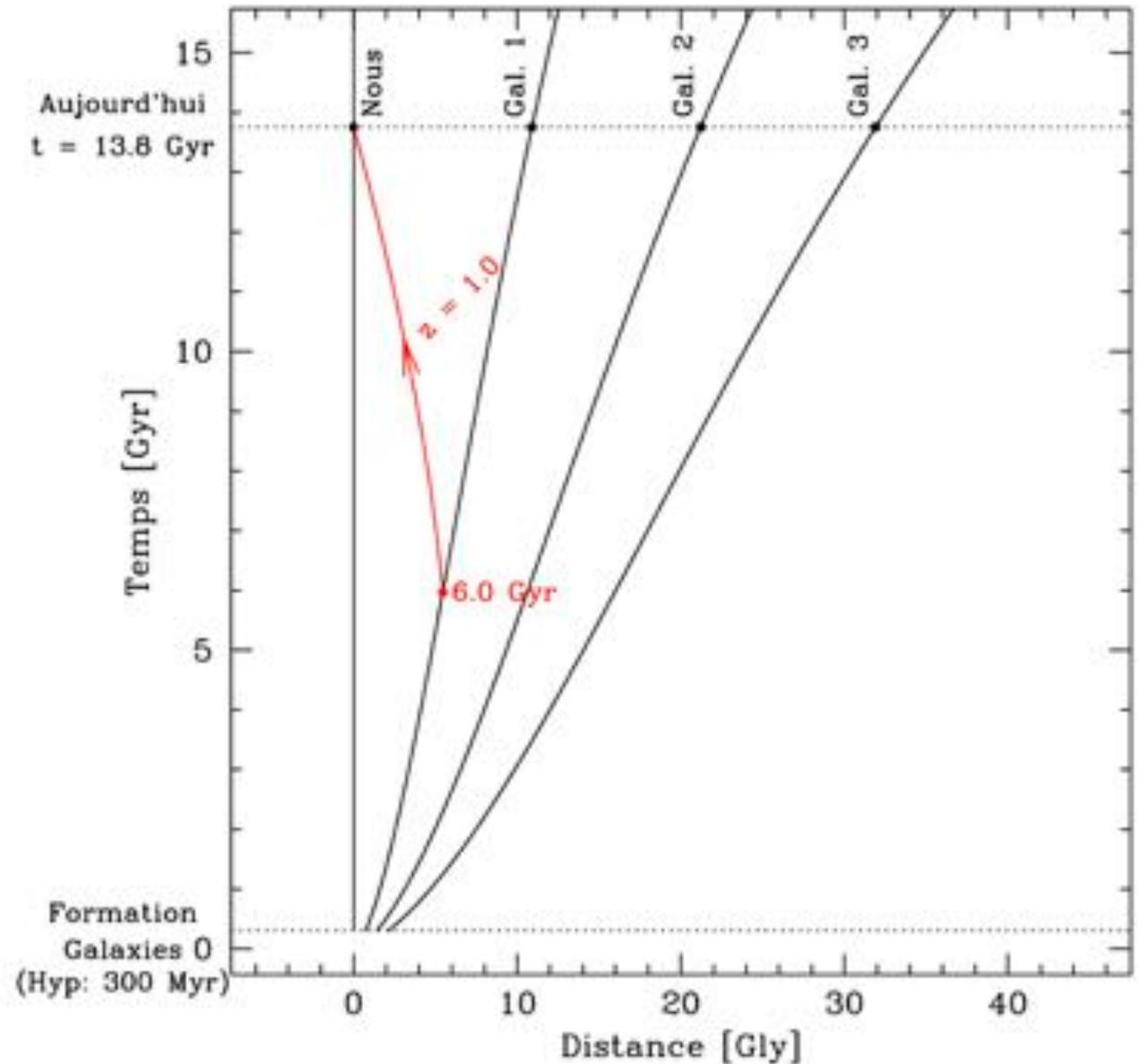
Les lignes d'Univers de trois galaxies distantes.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Quand ces galaxies ont-elles émis la lumière détectée aujourd'hui ?

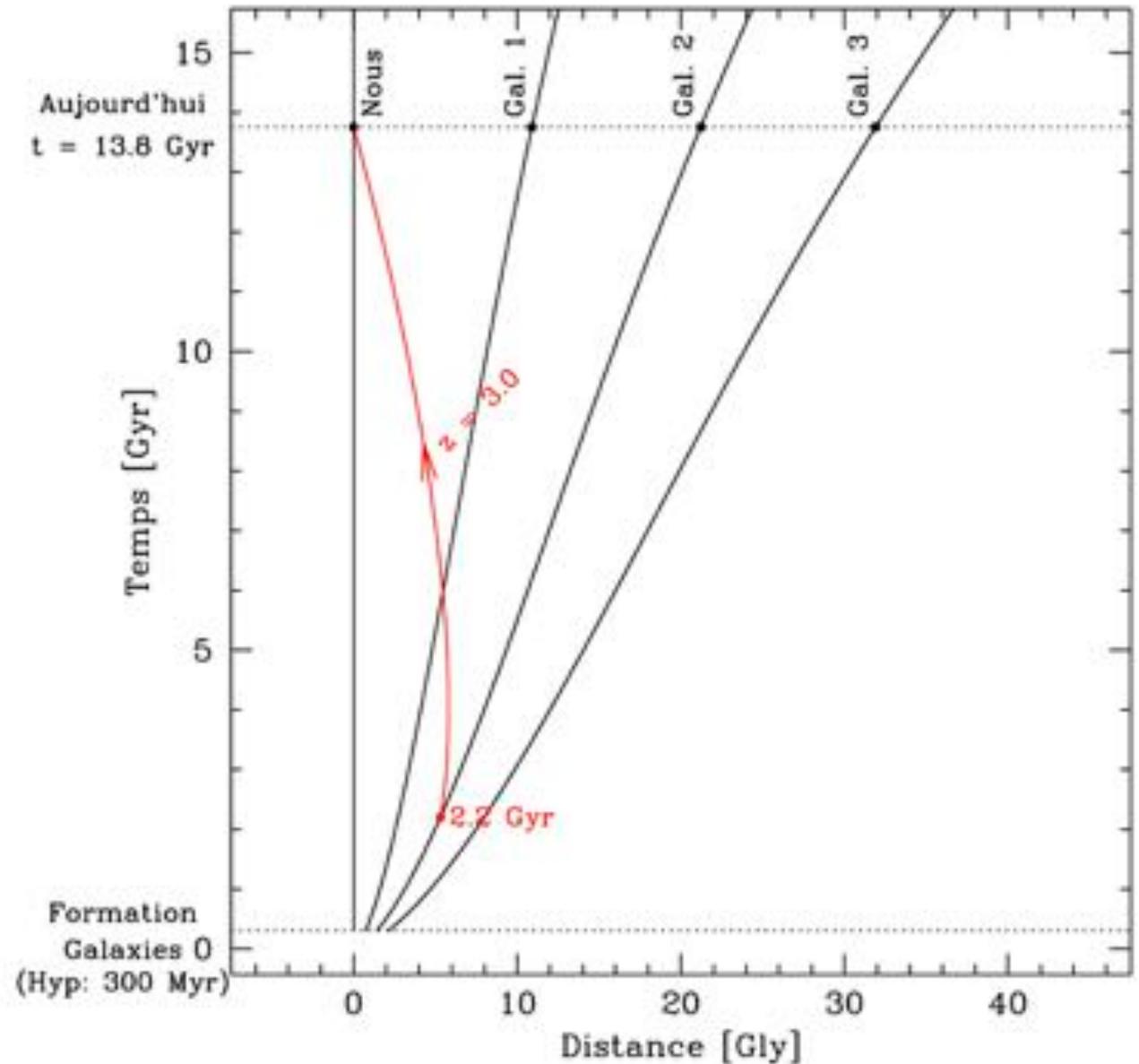
La galaxie 1 qui est observée à $z = 1$ a émis sa lumière lorsque l'Univers avait 6 Gyr.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Quand ces galaxies ont-elles émis la lumière détectée aujourd'hui ?

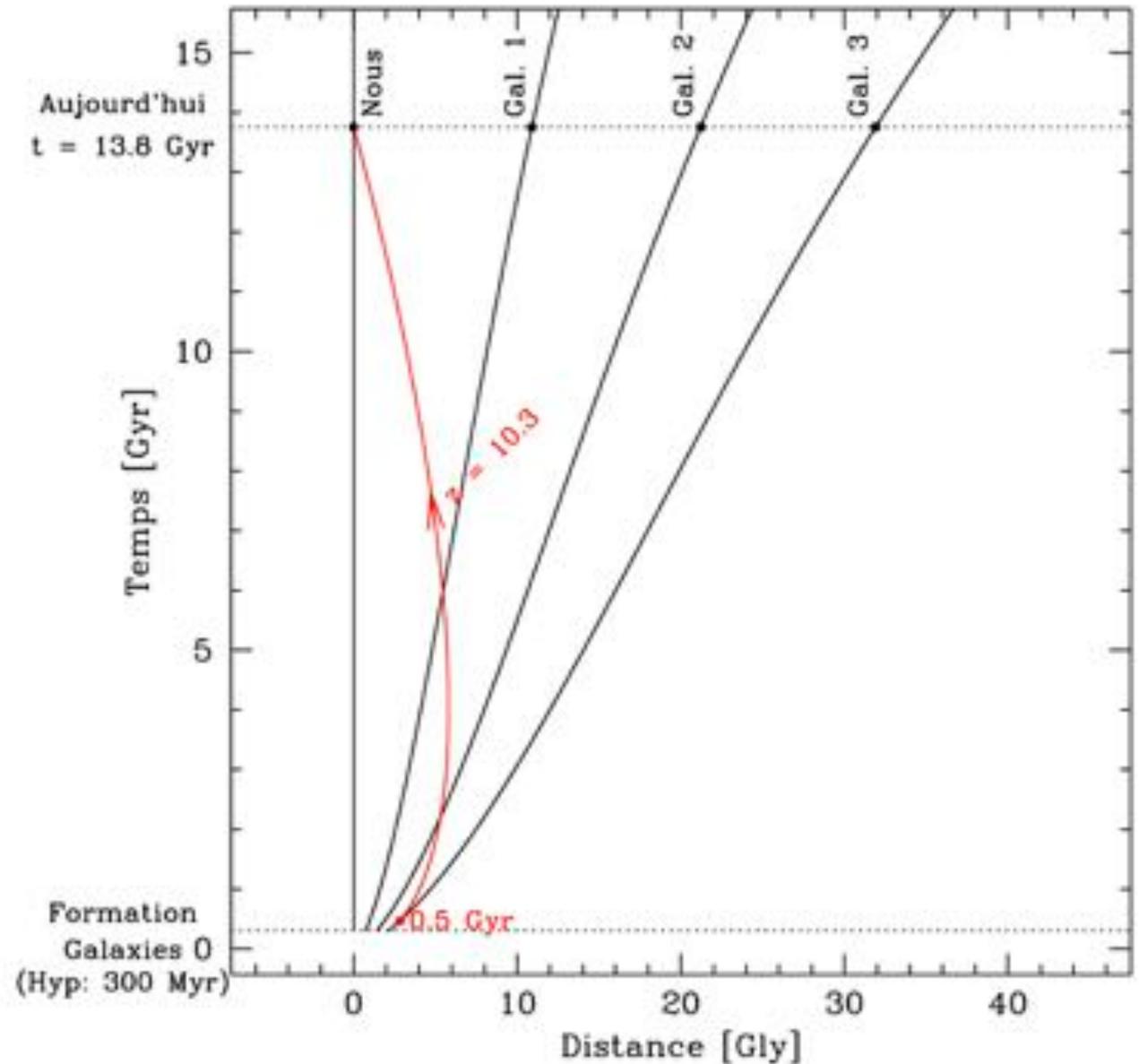
La galaxie 2 qui est observée à $z = 3$ a émis sa lumière lorsque l'Univers avait 2.2 Gyr.



Voir loin, c'est voir dans le passé

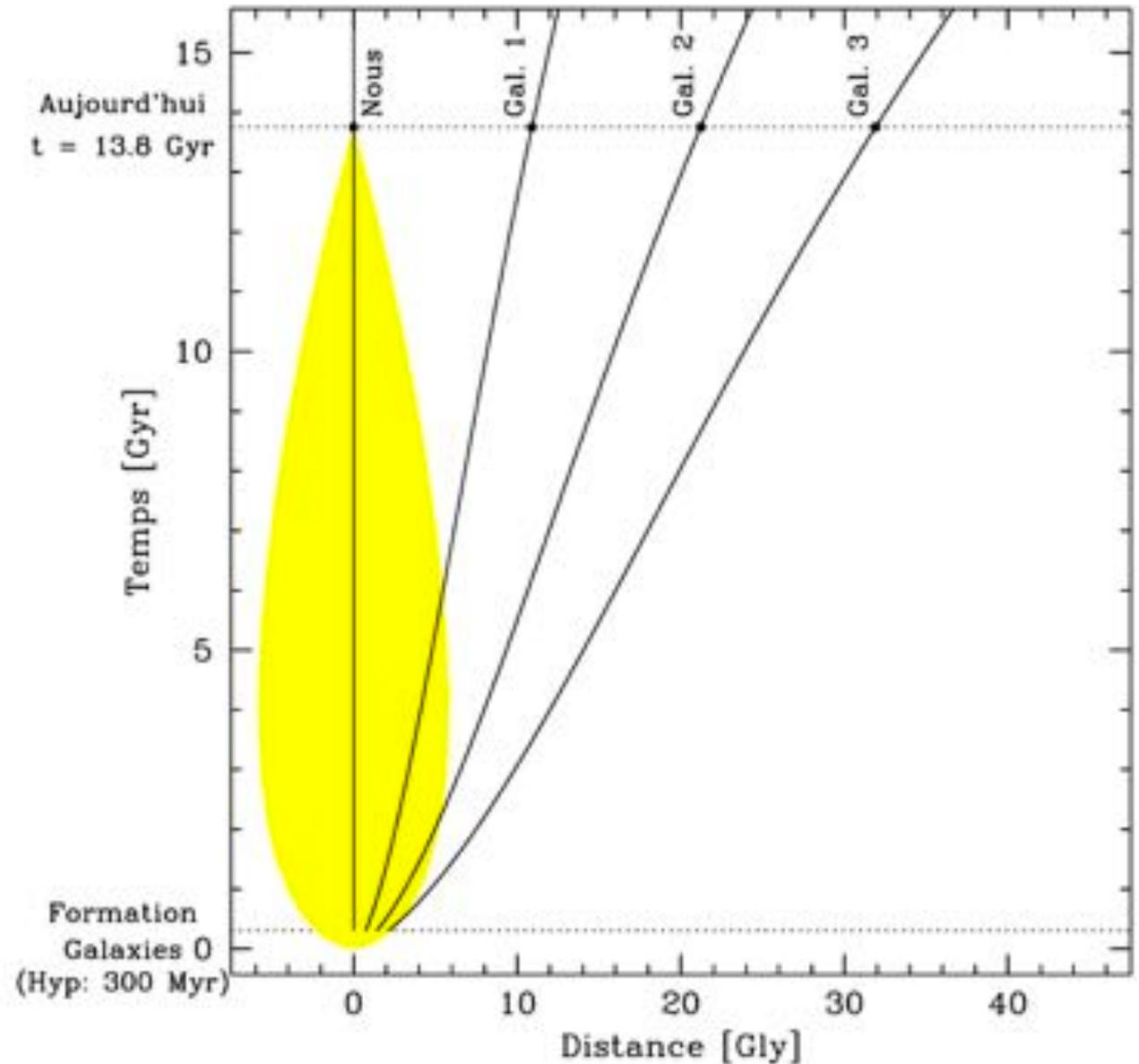
Quand ces galaxies ont-elles émis la lumière détectée aujourd'hui ?

La galaxie 3 qui est observée à $z = 10.3$ a émis sa lumière lorsque l'Univers avait 0.5 Gyr.



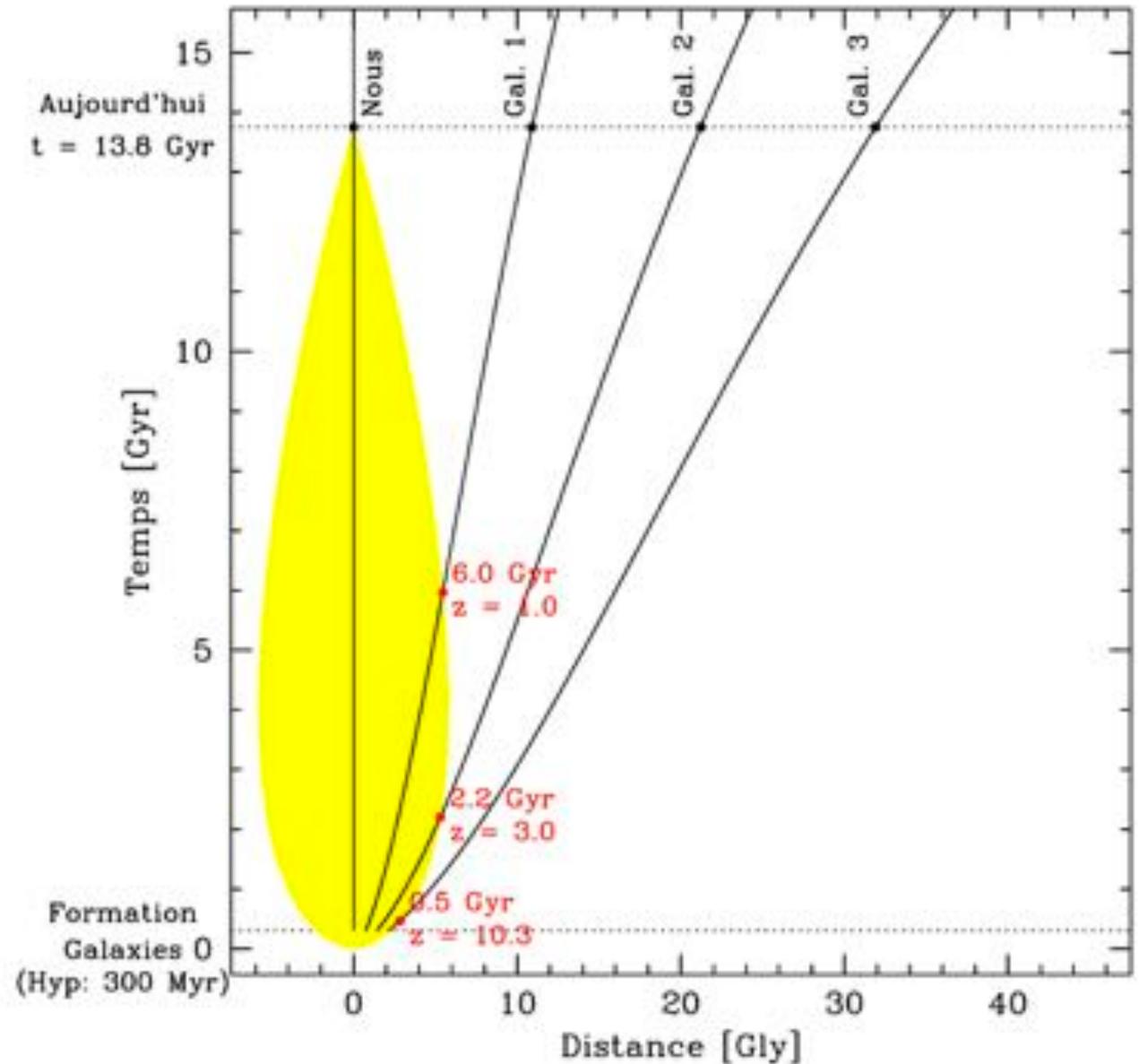
Voir loin, c'est voir dans le passé

Les galaxies que nous observons aujourd'hui sont dans notre cône de lumière.



Voir loin, c'est voir dans le passé

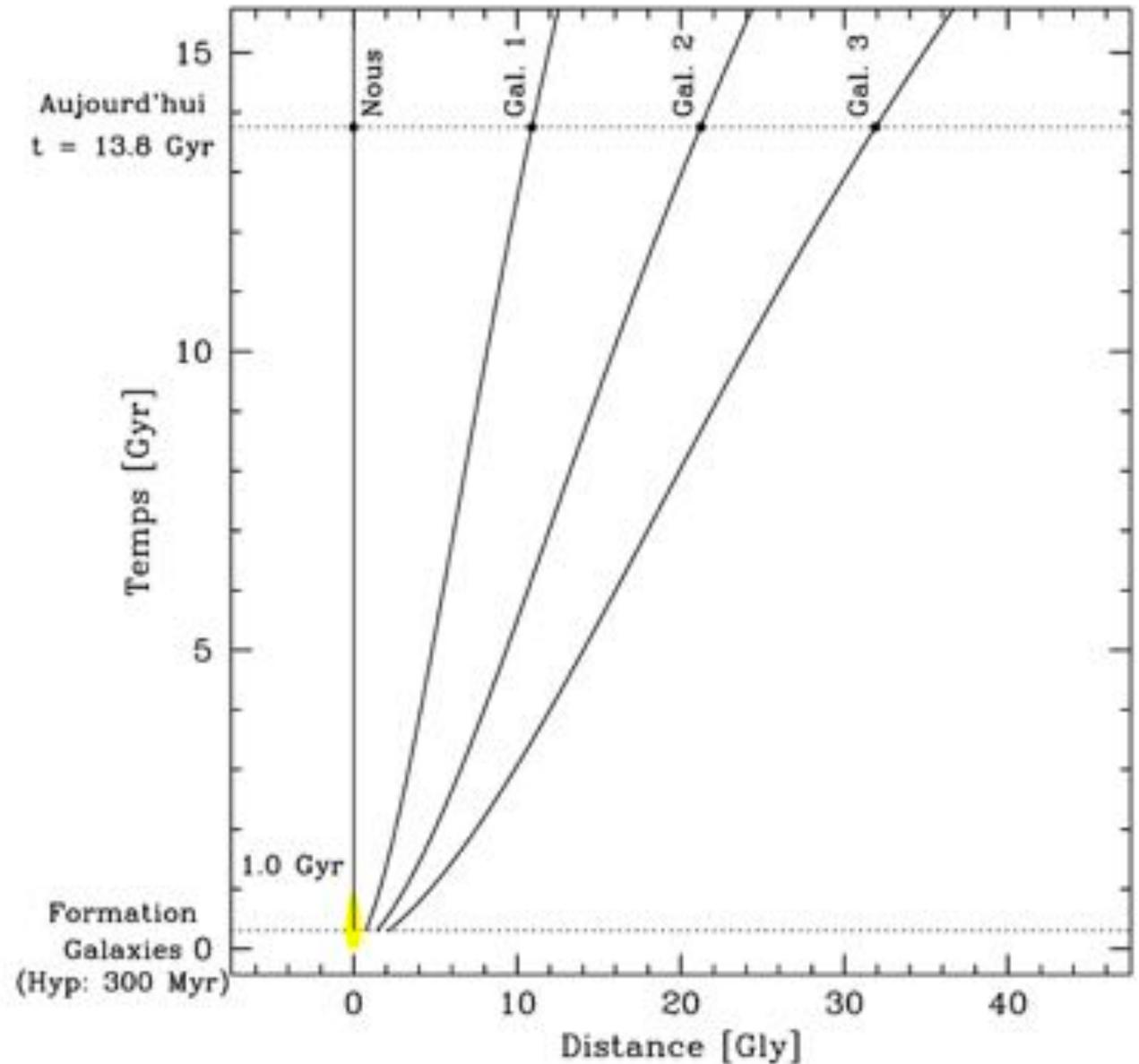
Les galaxies que nous observons aujourd'hui sont dans notre cône de lumière.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

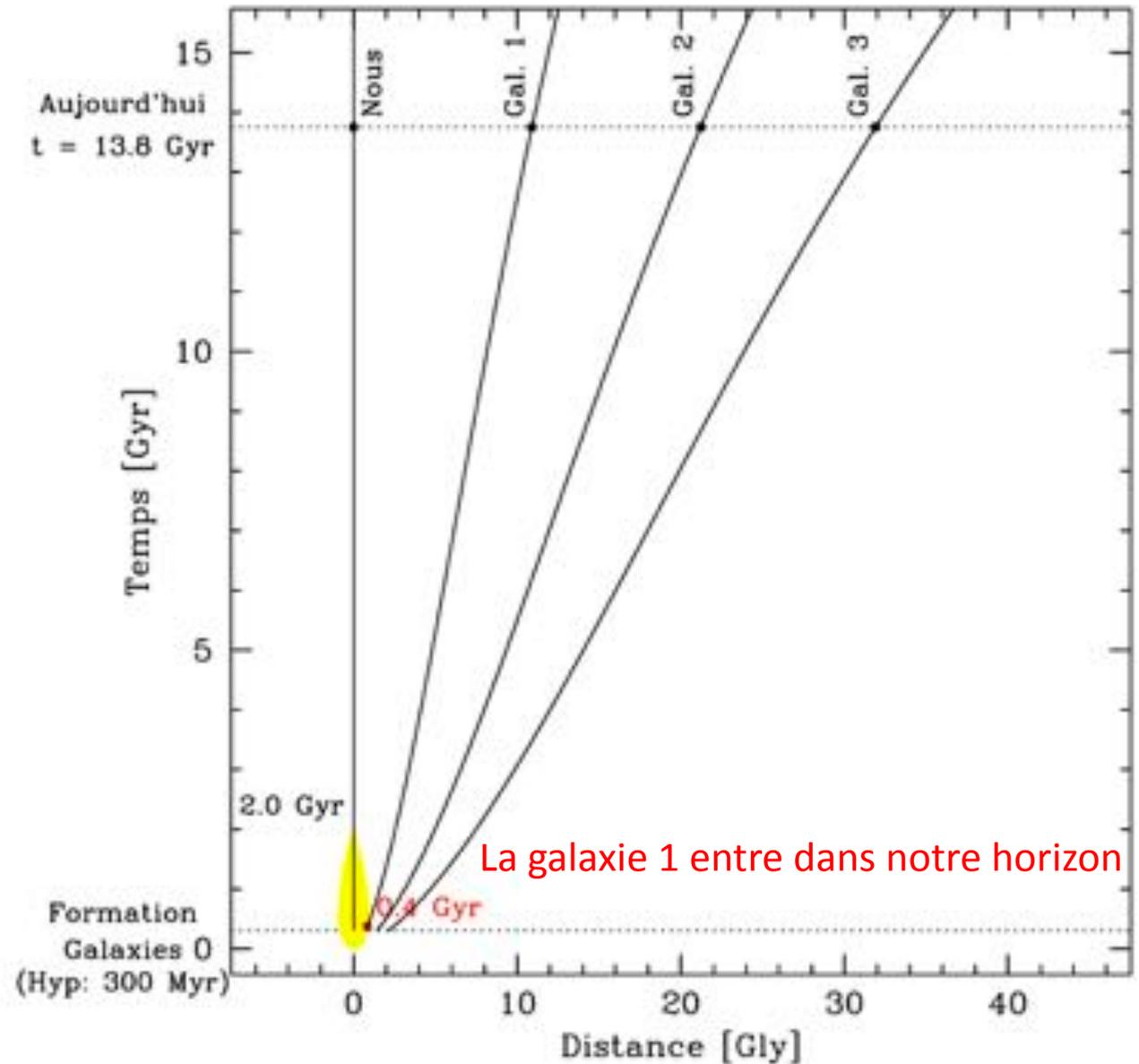
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

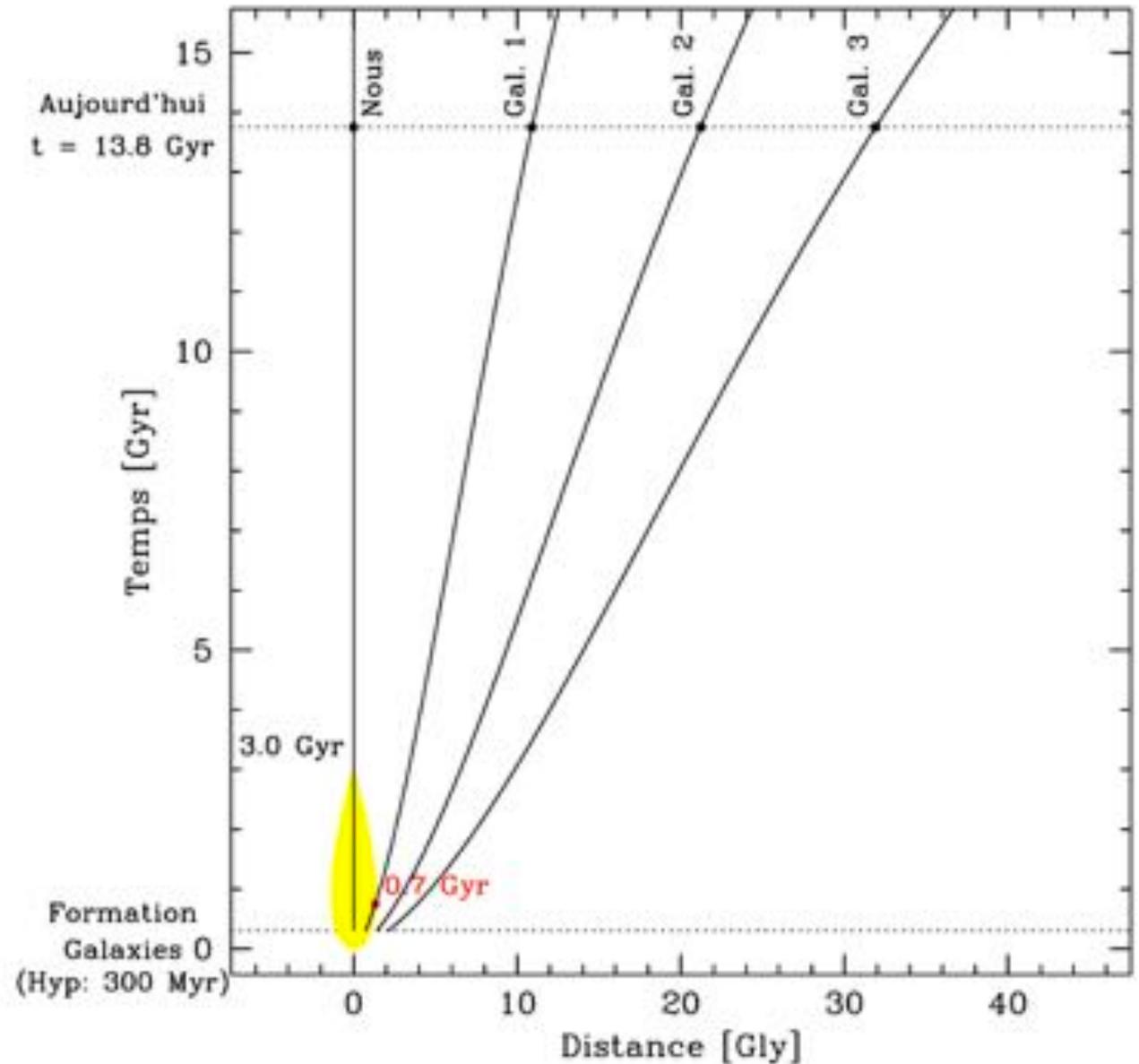
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

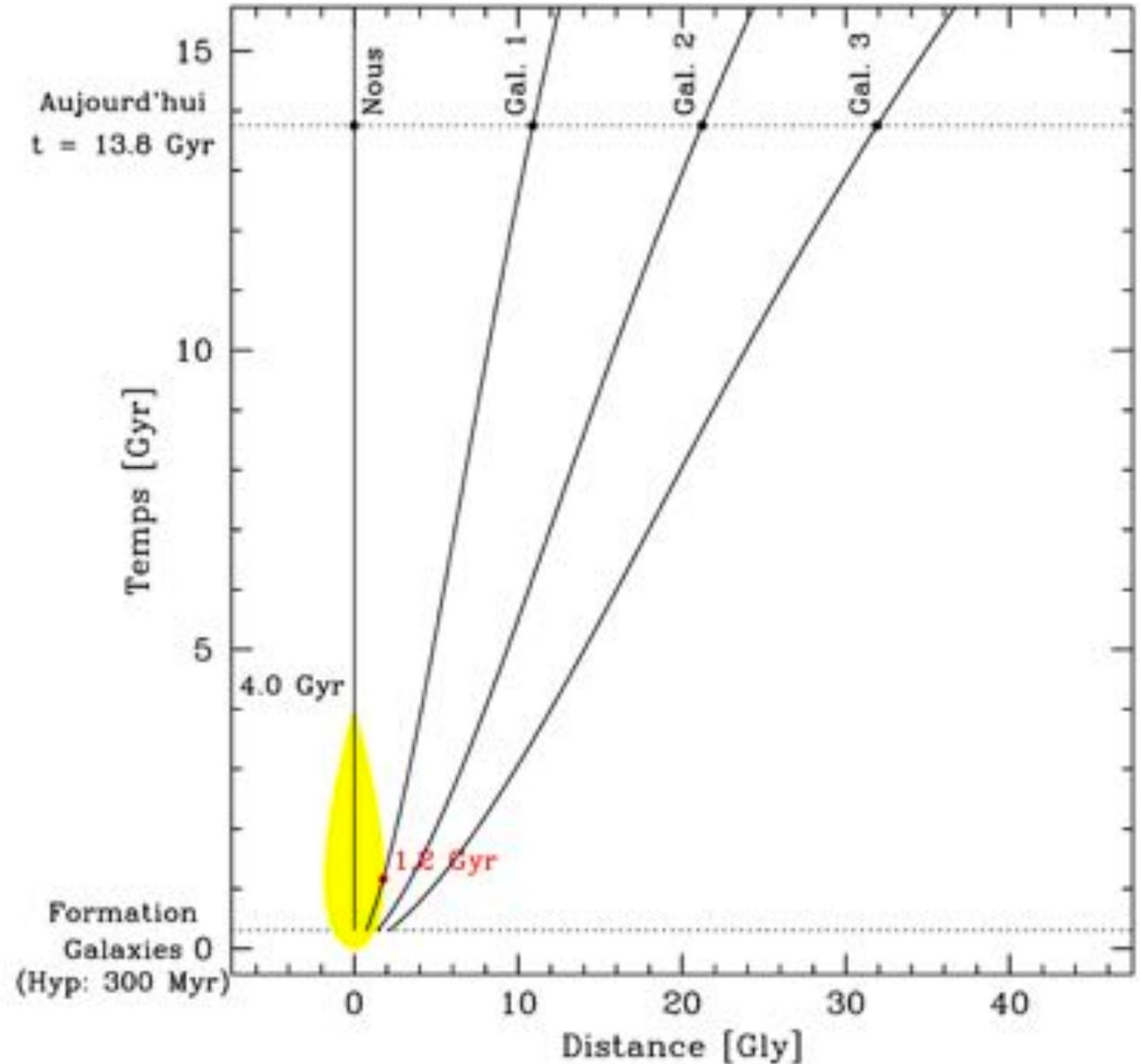
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

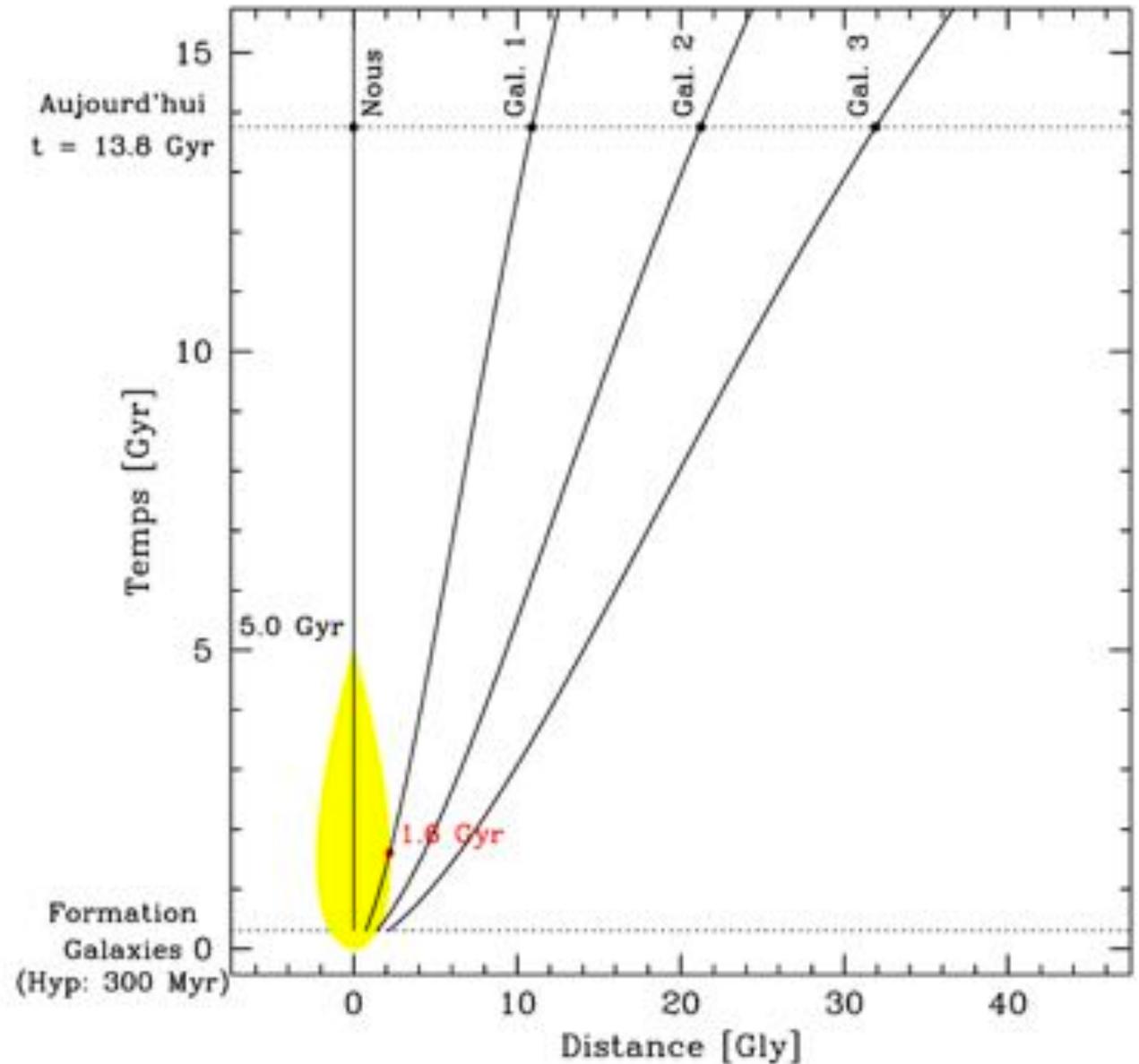
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

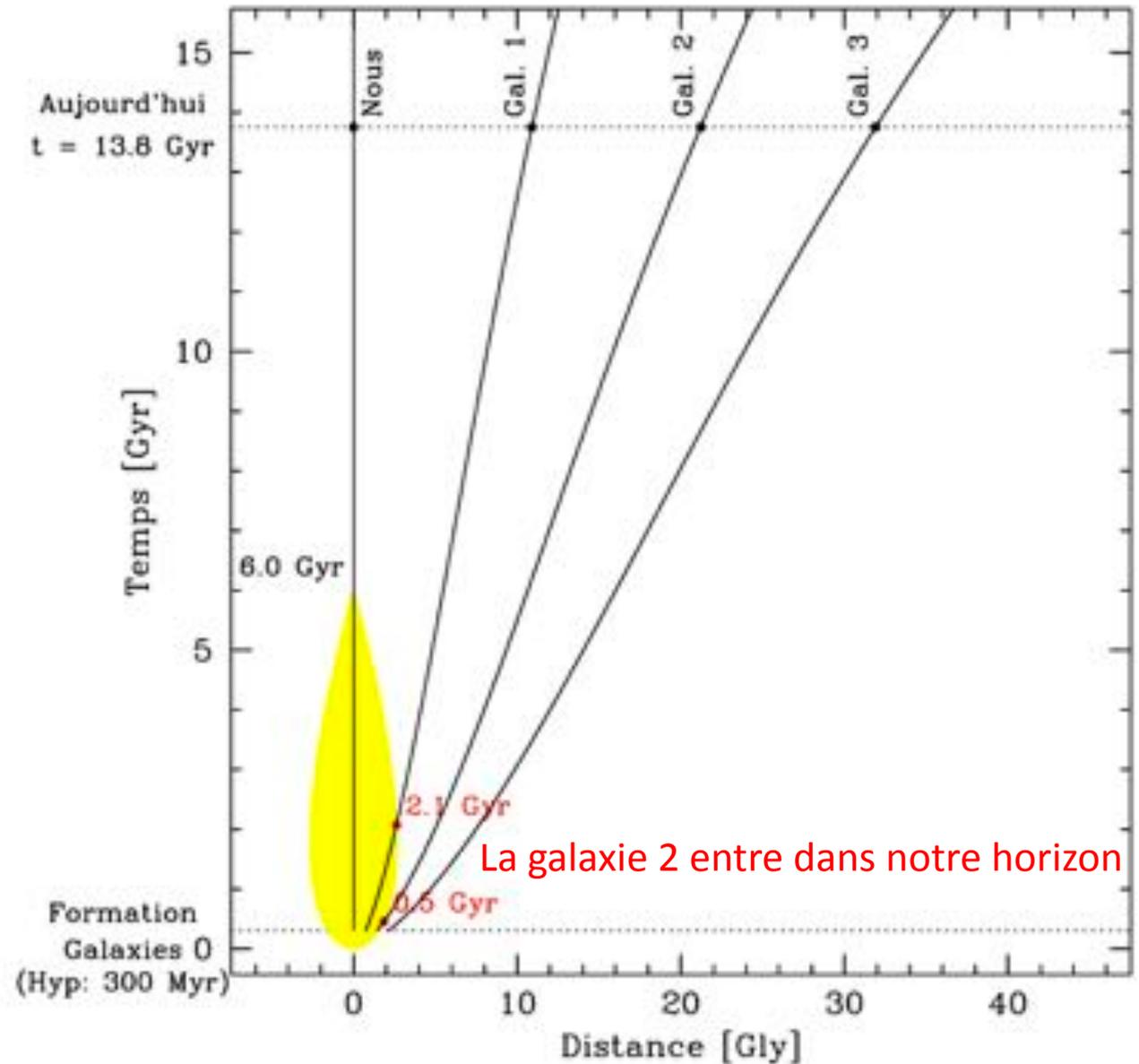
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

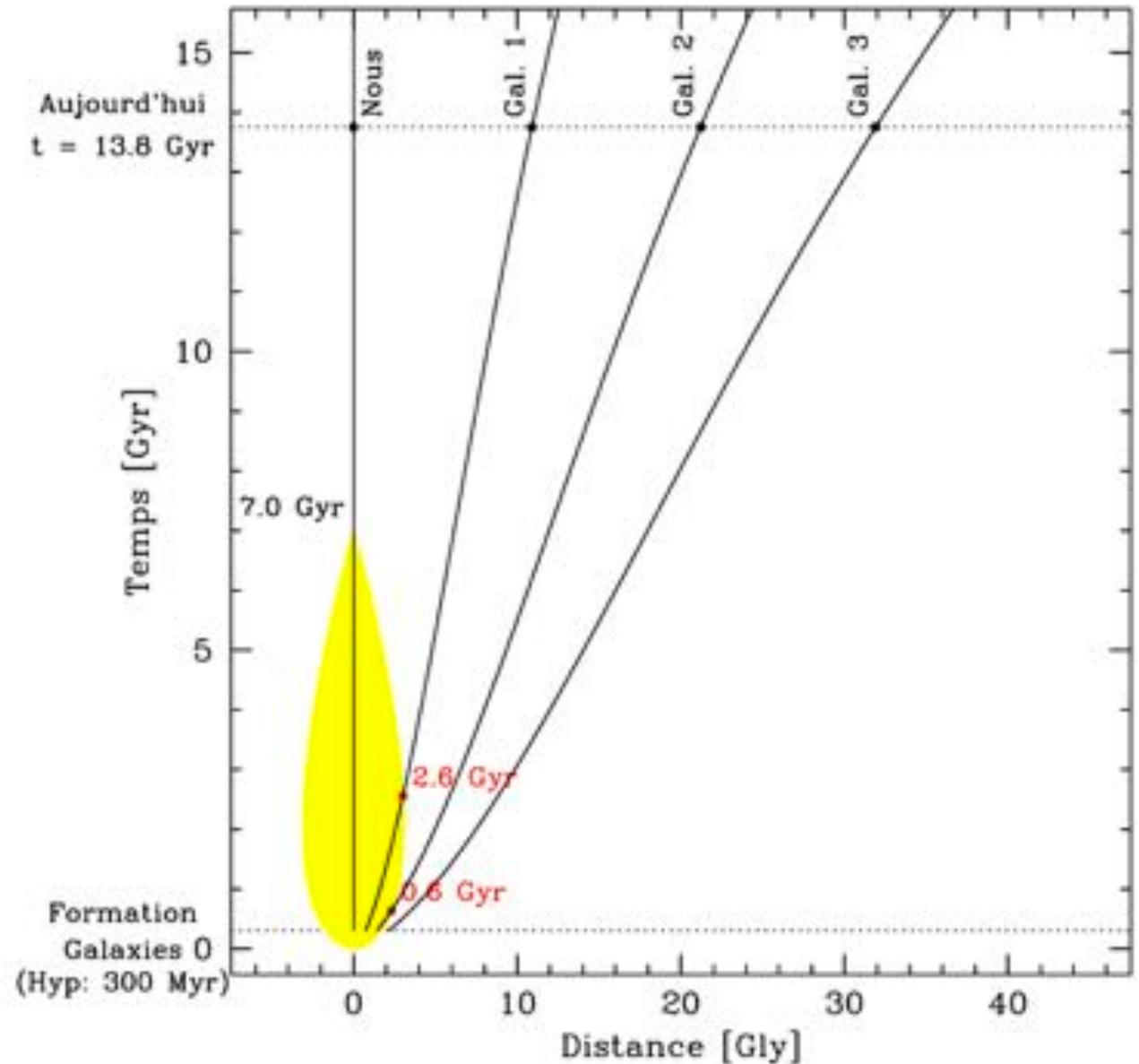
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

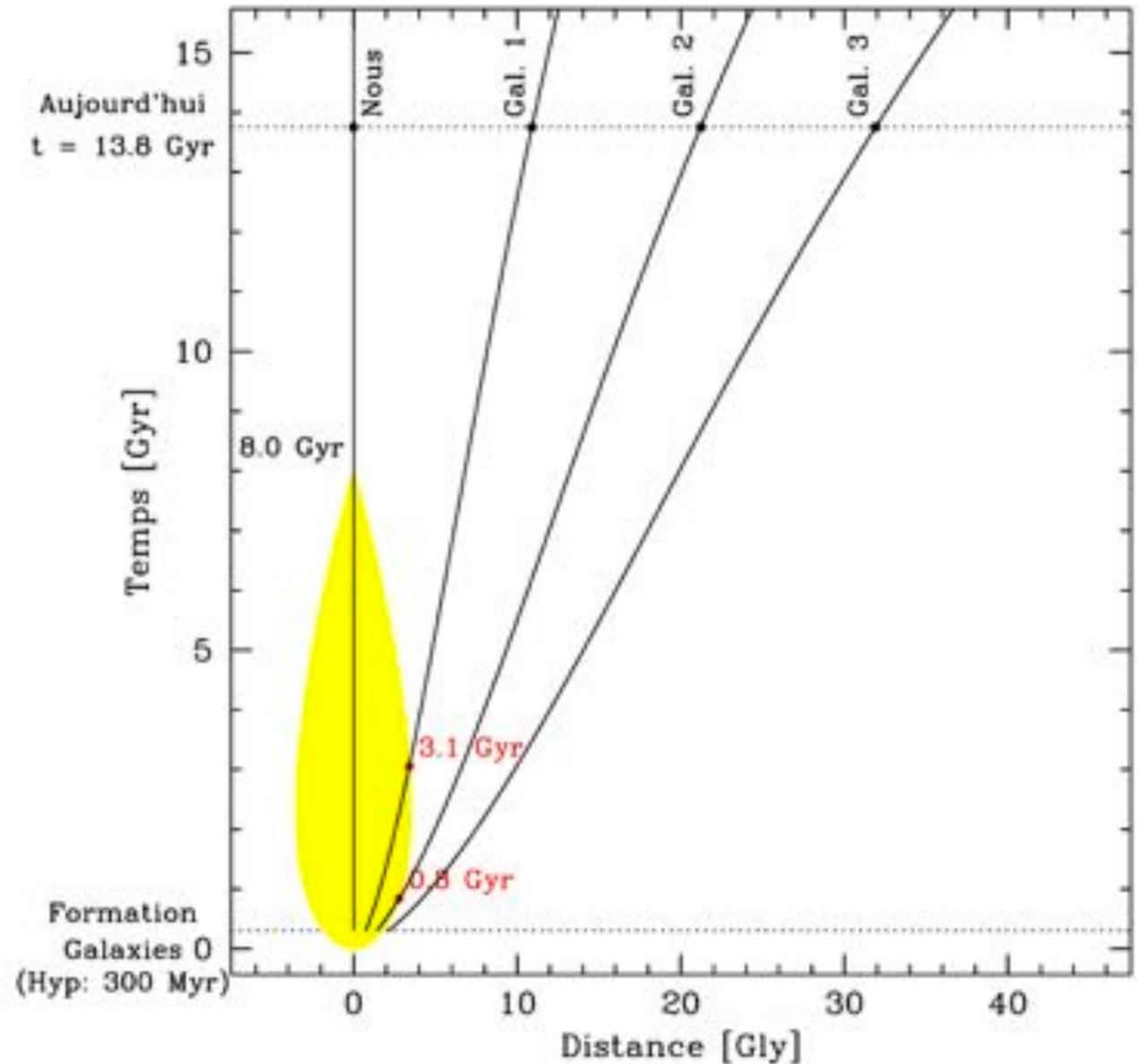
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

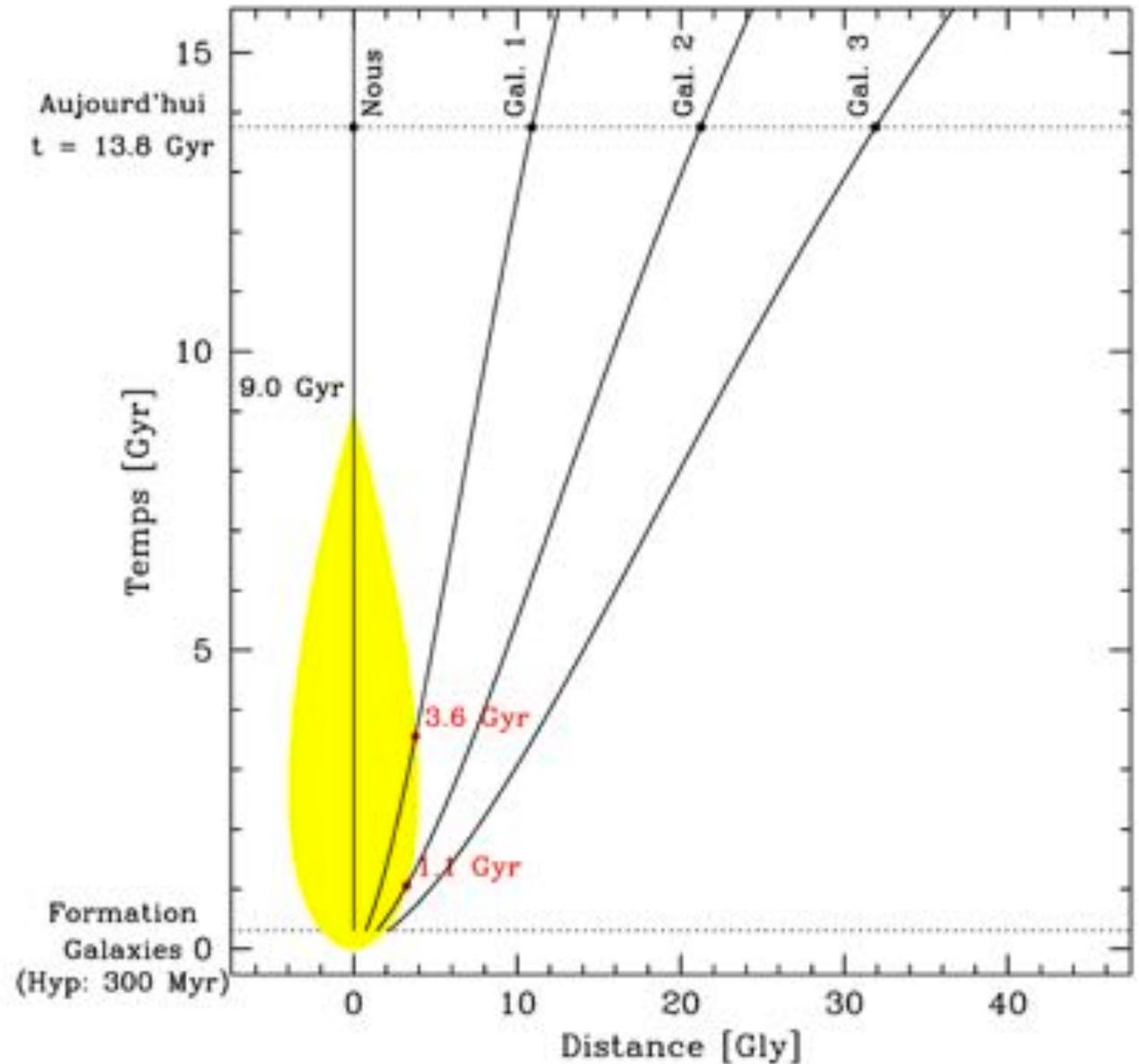
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

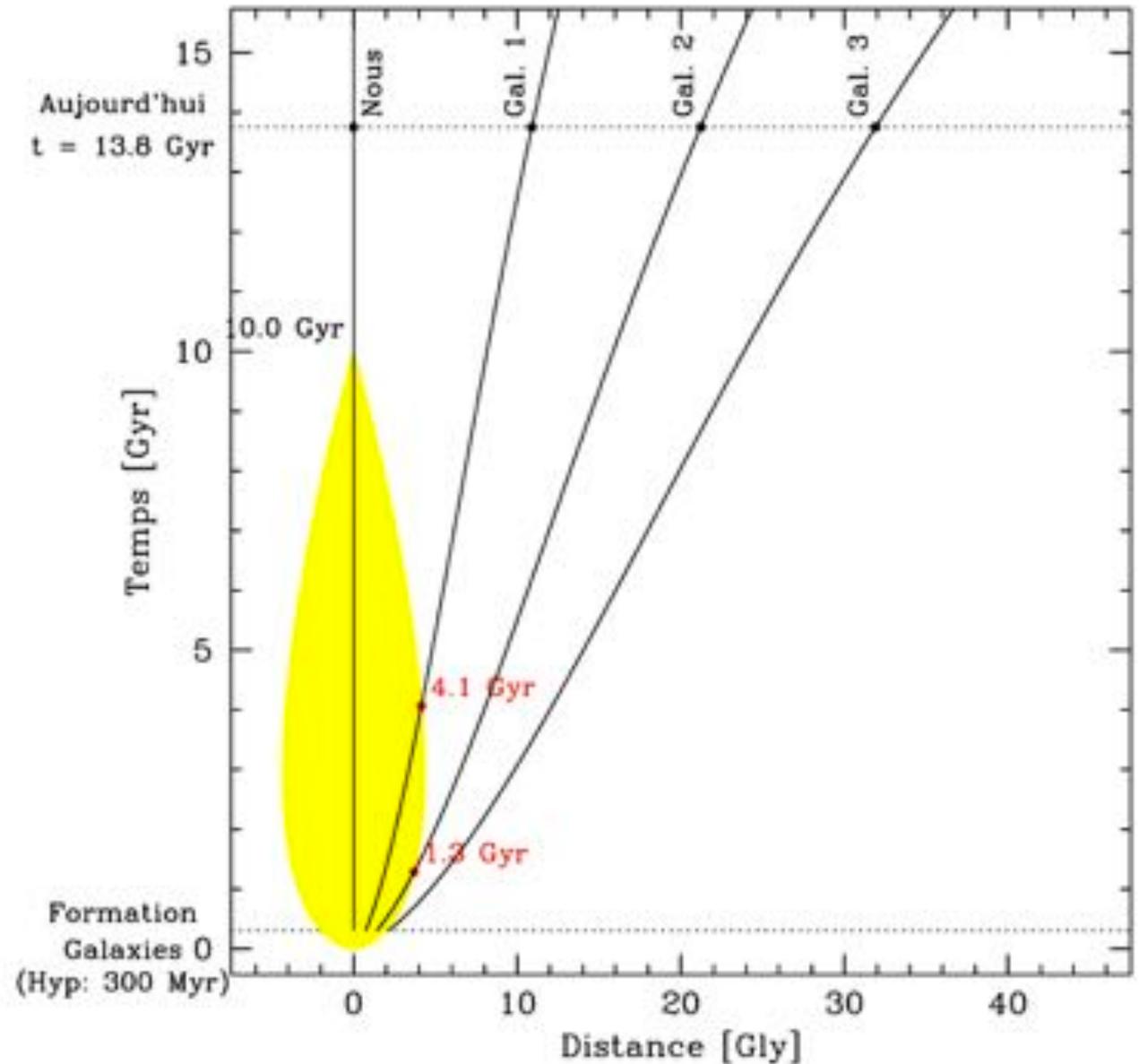
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

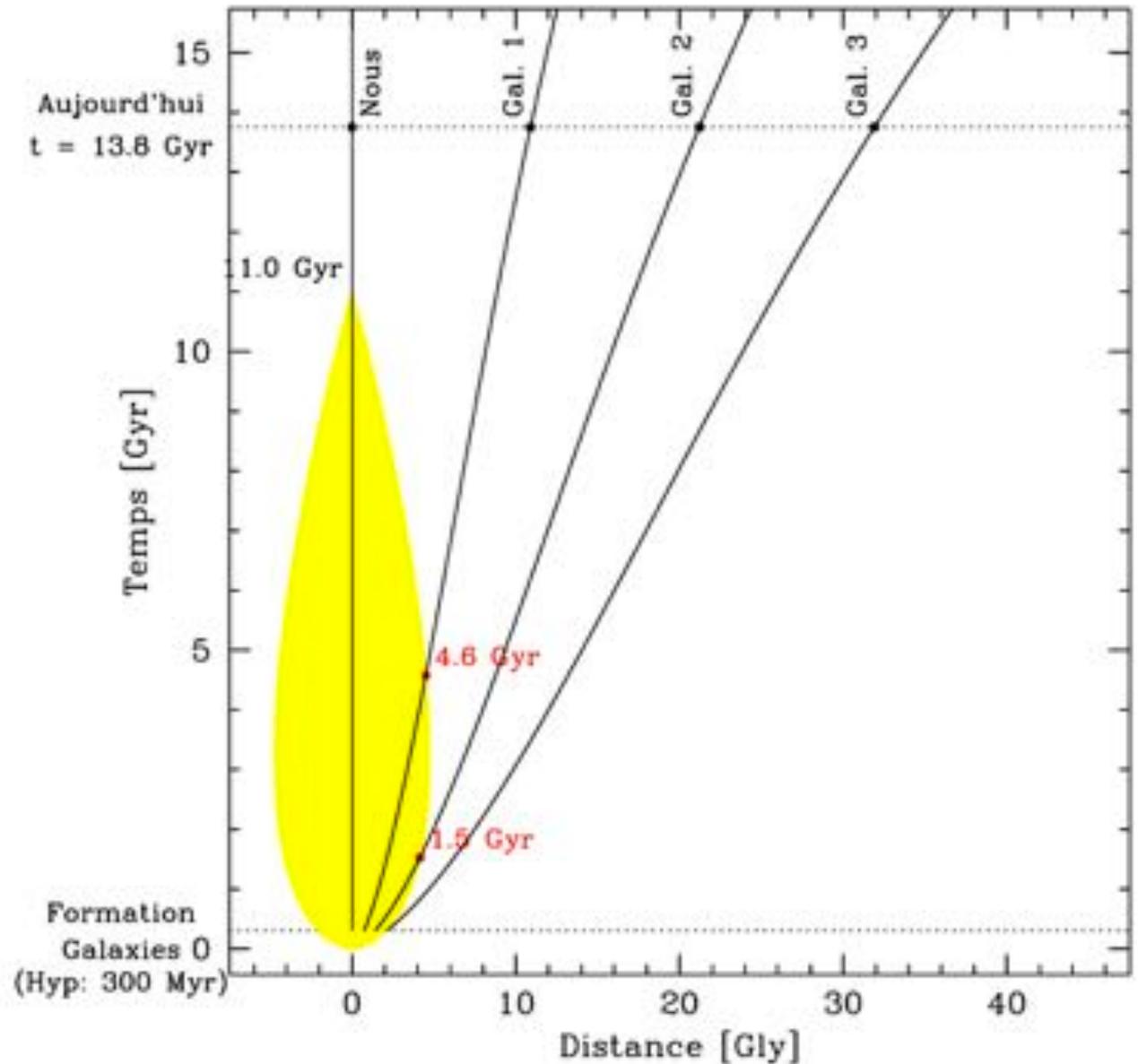
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

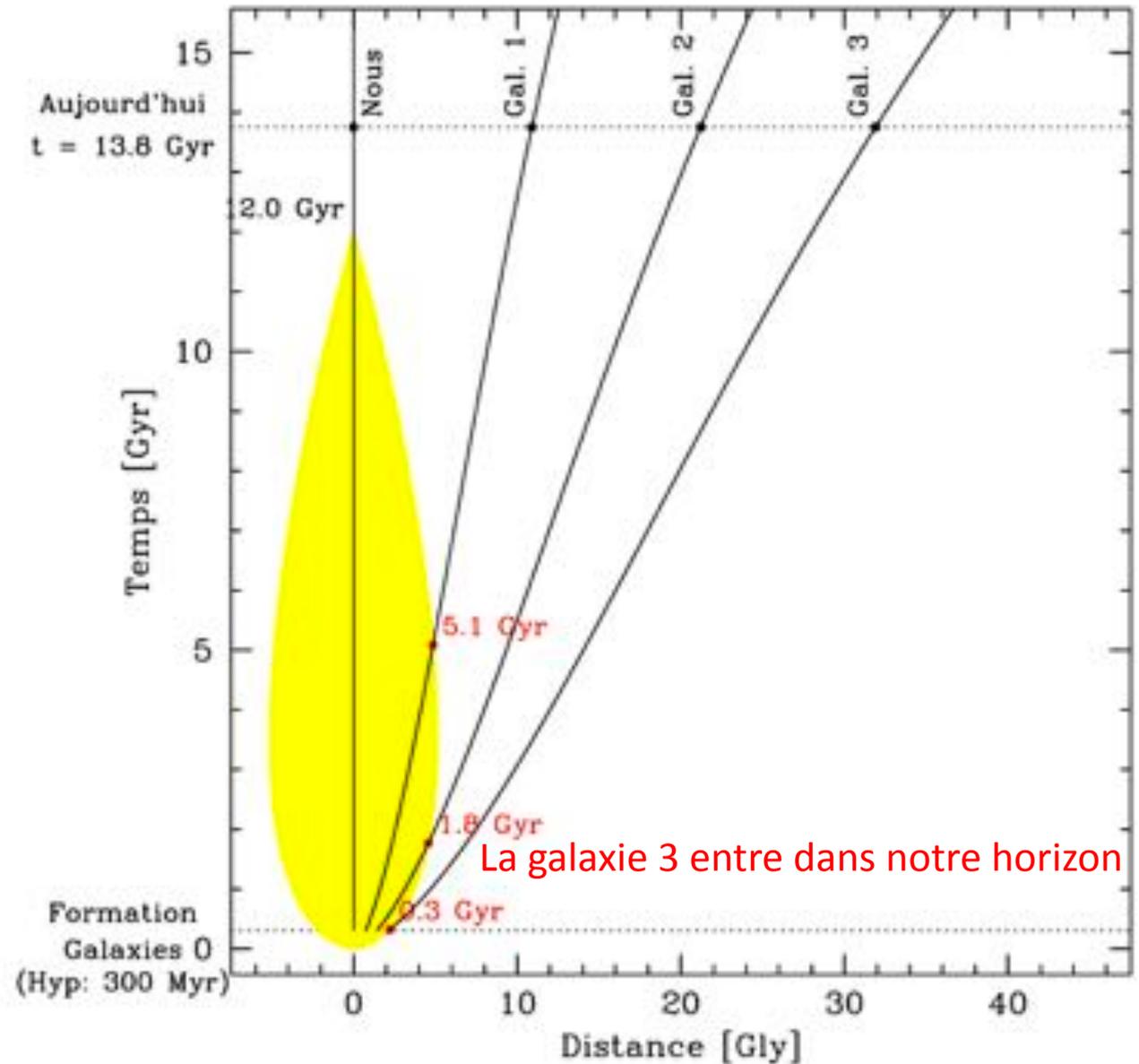
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

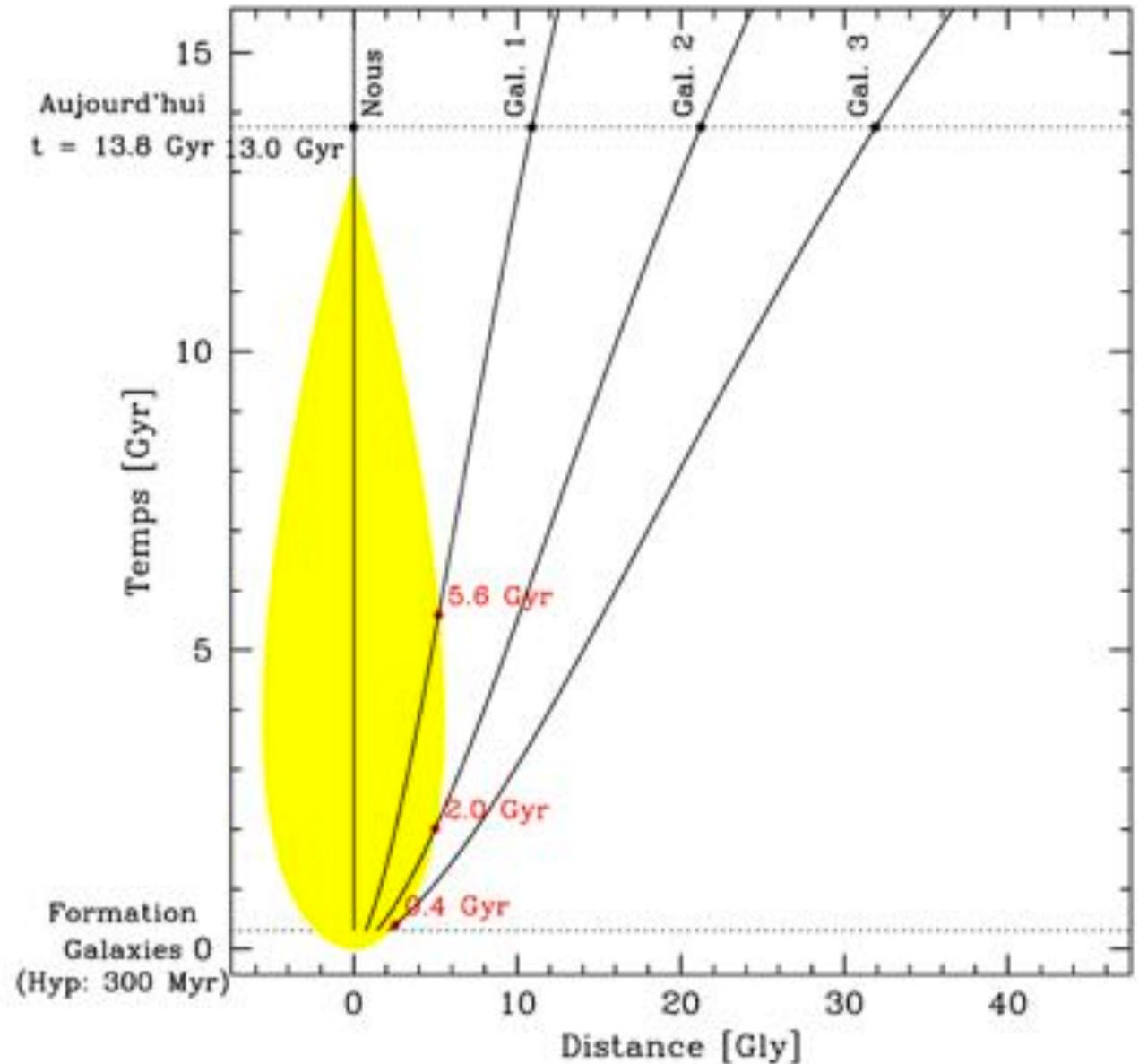
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

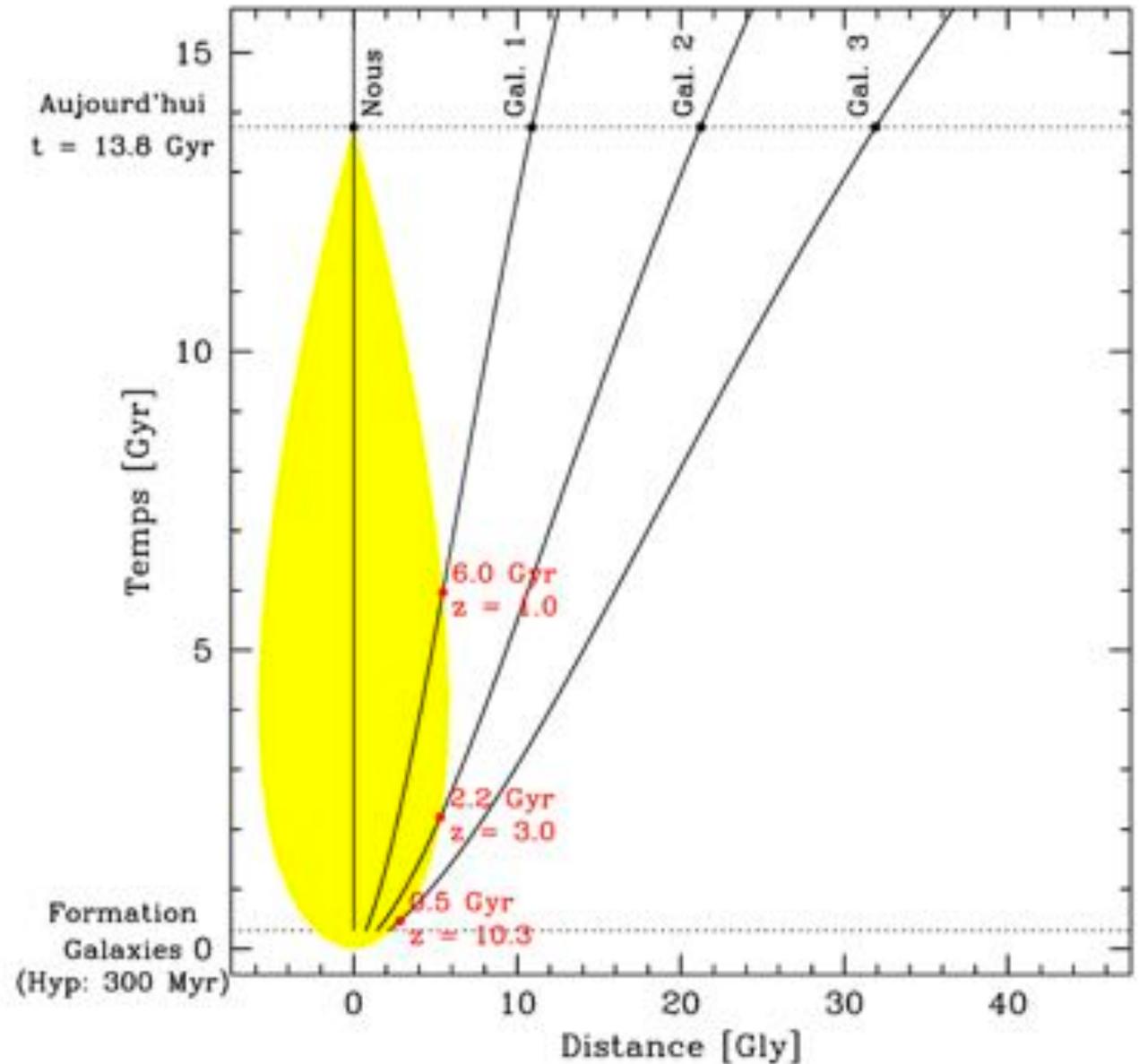
De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



Voir loin, c'est voir dans le passé

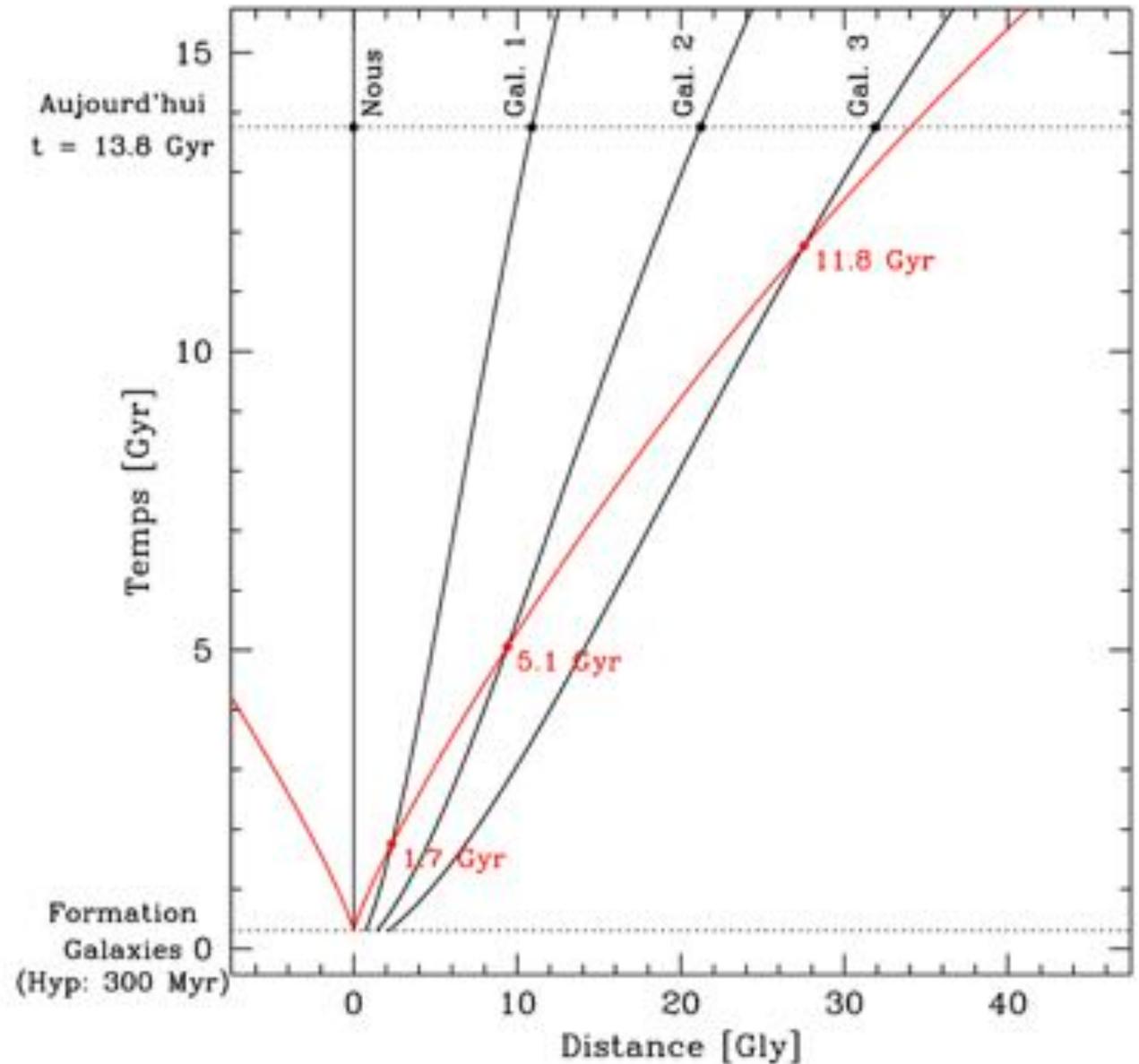
Notre cône de lumière évolue au cours du temps.

De nouvelles galaxies deviennent observables : elles entrent dans notre horizon.



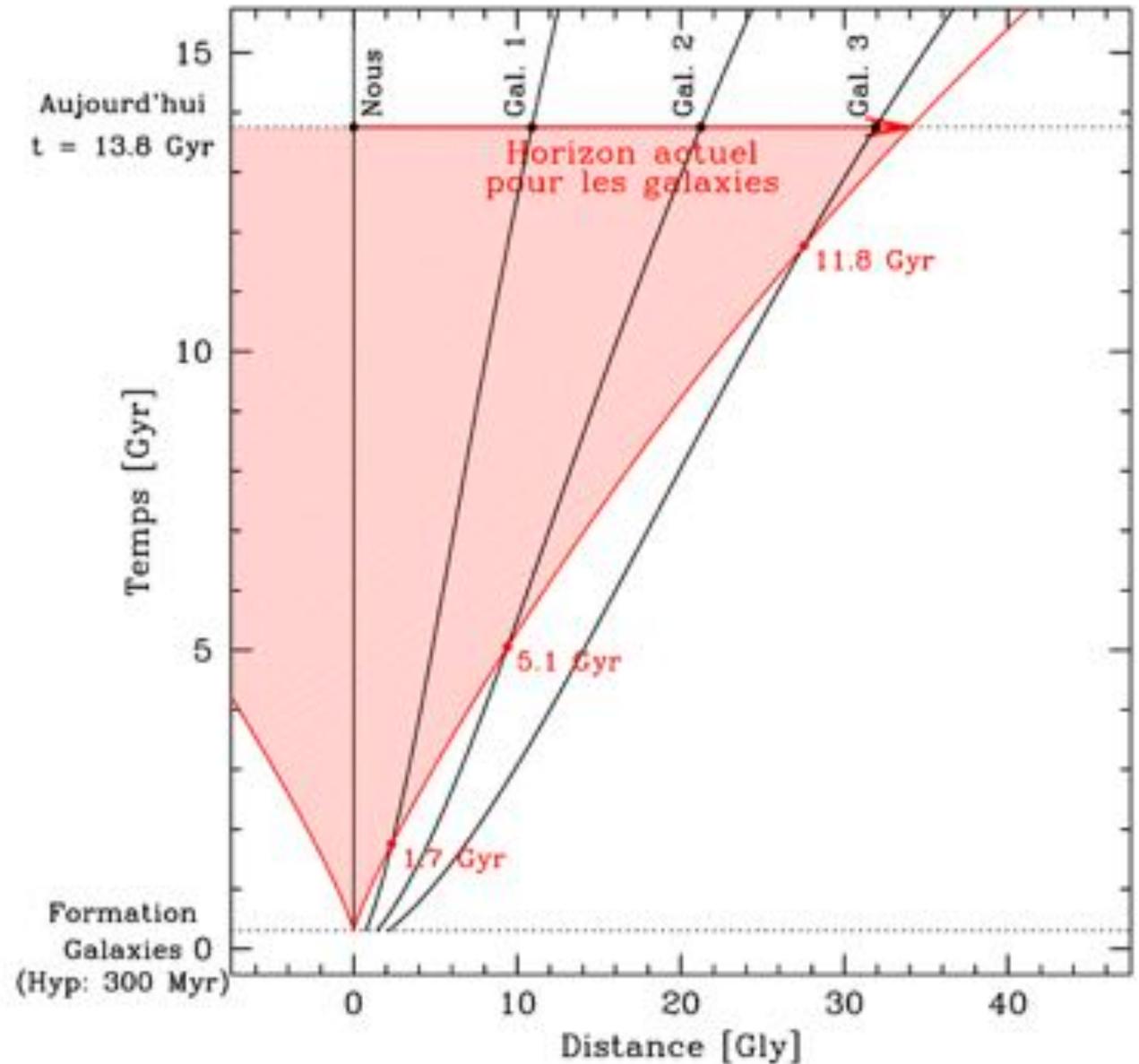
Voir loin, c'est voir dans le passé

Ceci définit notre *horizon* : la région de l'Univers qui a déjà pu nous envoyer un message lumineux...



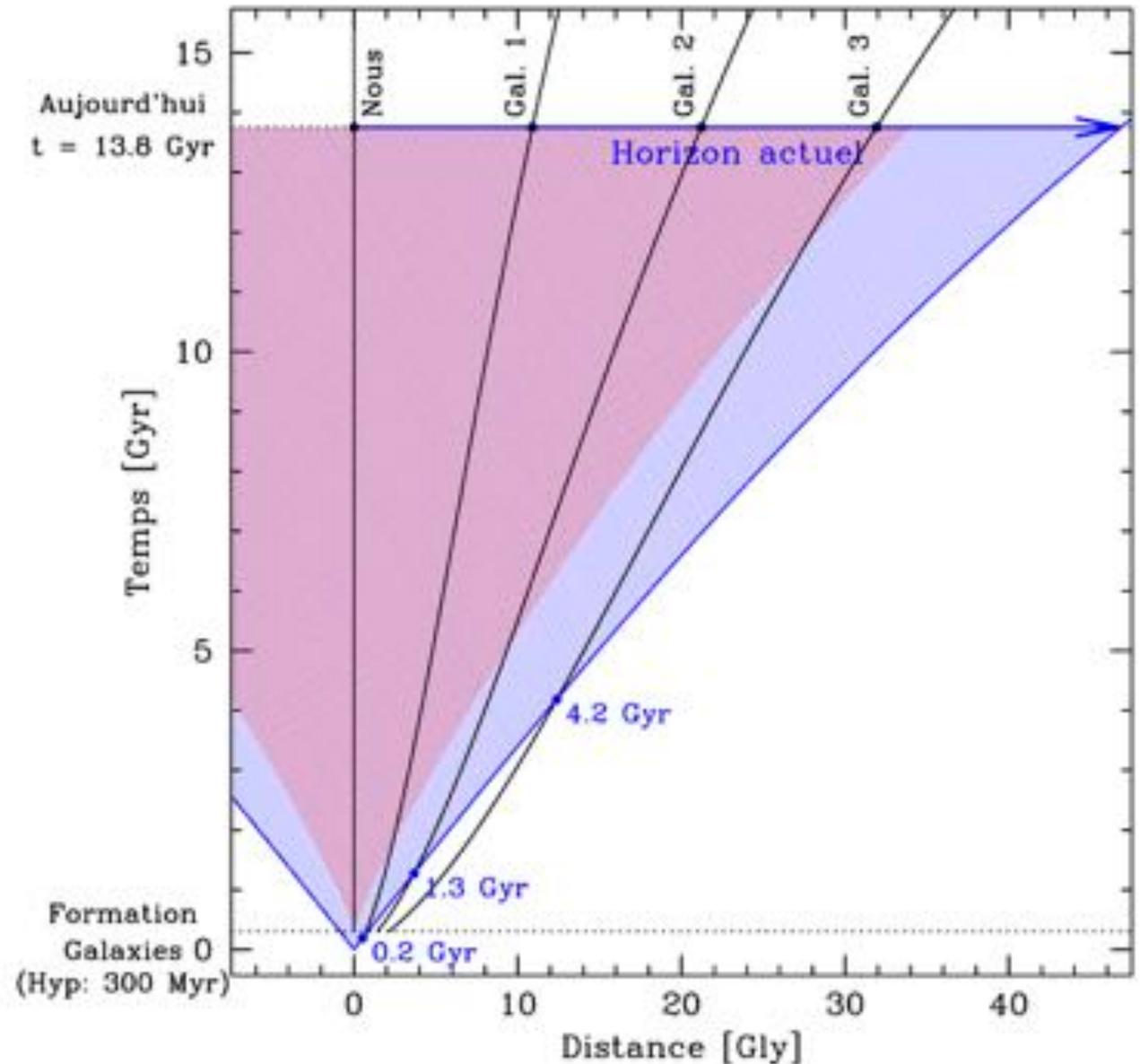
Voir loin, c'est voir dans le passé

Ceci définit notre *horizon* : la région de l'Univers qui a déjà pu nous envoyer un message lumineux...



Voir loin, c'est voir dans le passé

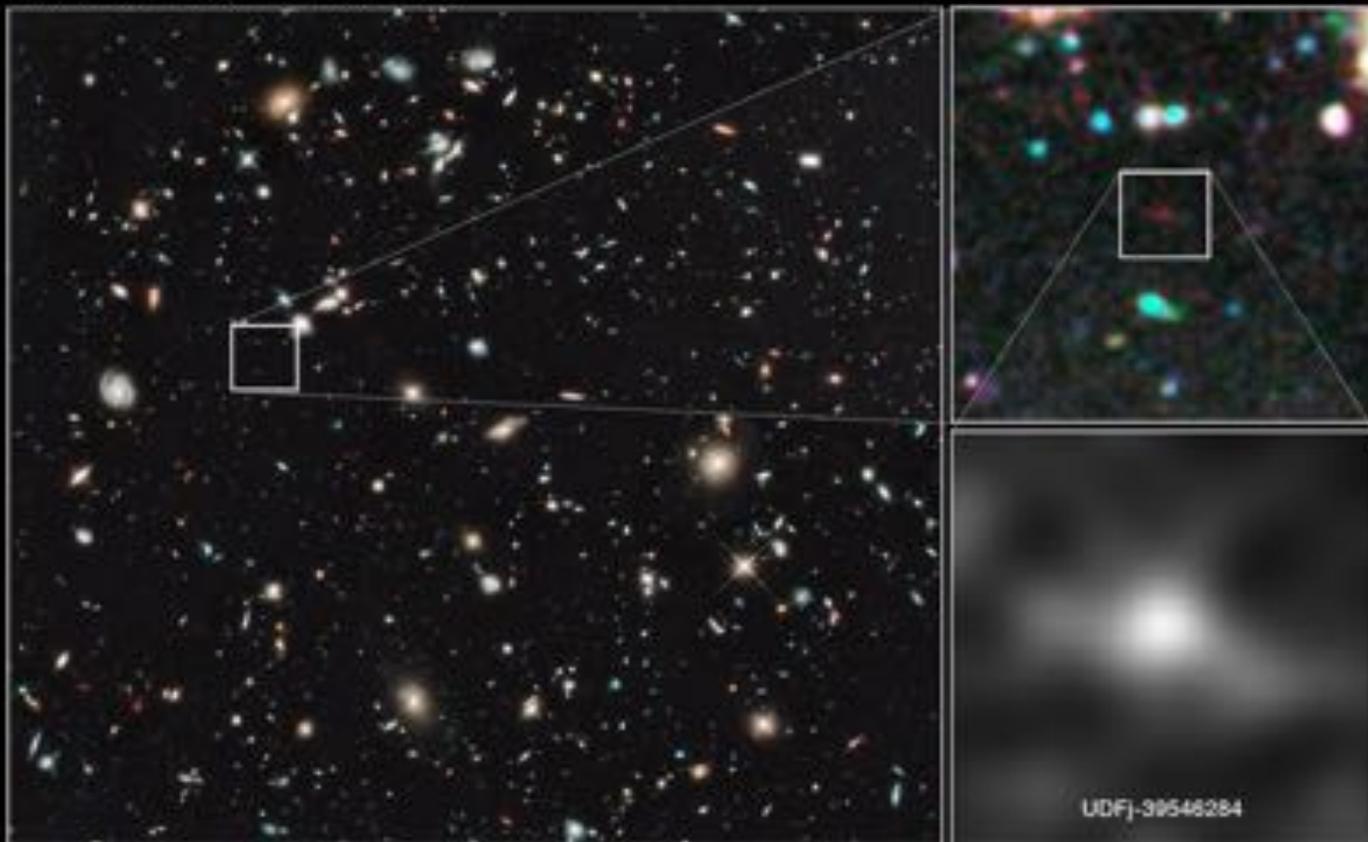
Ceci définit notre *horizon* : la région de l'Univers qui a déjà pu nous envoyer un message lumineux...



Voir loin, c'est voir dans le passé

Un exemple: la galaxie UDFj-39546284 est la galaxie la plus lointaine actuellement connue, elle a été découverte dans le Hubble Ultra Deep Field.

- Sa lumière est très fortement décalée vers le rouge $z = \Delta\lambda/\lambda = 10.3$!
- Sa lumière a mis 13.3 milliards d'années pour nous parvenir !
- Sa lumière a été émise quand l'Univers était âgé de 500 millions d'années !
- En admettant qu'elle se soit formée lorsque l'Univers était âgé de 300 Myr, cette galaxie est entrée dans notre horizon depuis 2 Gyr seulement...



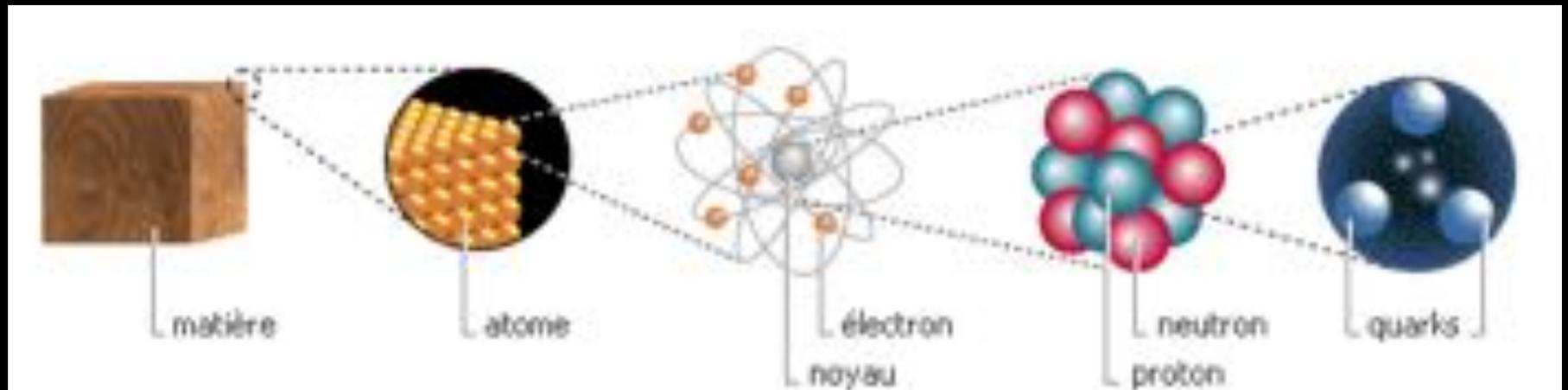
Qui subit l'expansion ?

L'expansion est un effet très faible à courte distance. Une force, même très faible, suffit à la stopper. Il y a au total quatre interactions fondamentales dans l'Univers susceptibles de jouer ce rôle.

▪ L'interaction faible :

- est très peu intense, n'agit qu'à très courte distance
- est à l'origine de la désintégration radioactive
- joue un rôle important pour la fusion nucléaire (par exemple au cœur du Soleil, cf. cours n°2)
- ne joue aucun rôle dans la cohésion des structures

Rappel : les constituants élémentaires de la matière (cf. cours n°2)

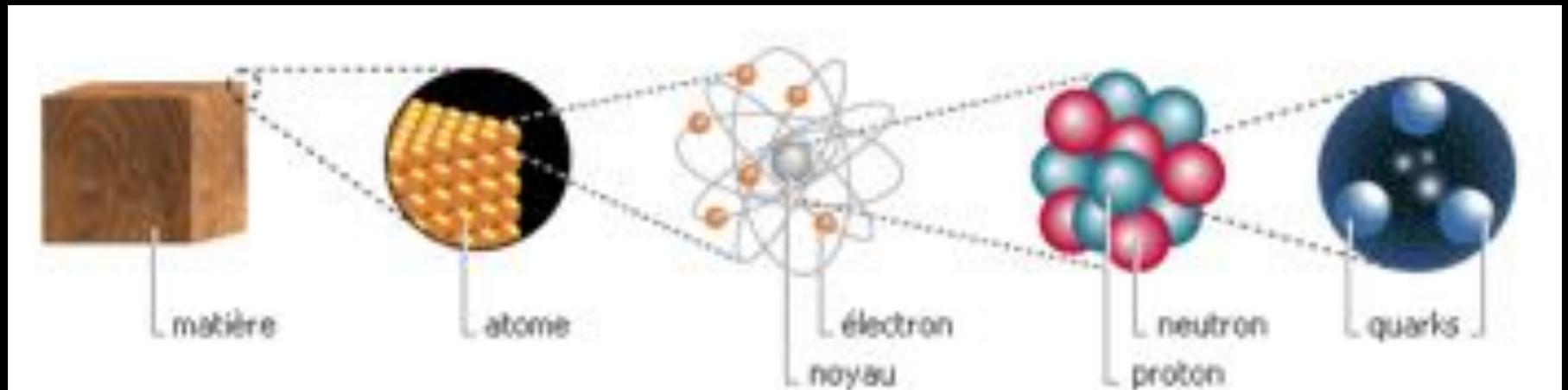


Qui subit l'expansion ?

L'expansion est un effet très faible à courte distance. Une force, même très faible, suffit à la stopper. Il y a au total quatre interactions fondamentales dans l'Univers susceptibles de jouer ce rôle.

- L'*interaction forte* : cohésion des noyaux atomiques et des nucléons.
 - n'agit qu'à très courte distance (taille du noyau)
 - beaucoup plus intense que toutes les autres forces, en particulier la gravité.
 - Un nucléon ou un noyau n'est donc absolument pas sensible à l'expansion.

Rappel : les constituants élémentaires de la matière (cf. cours n°2)

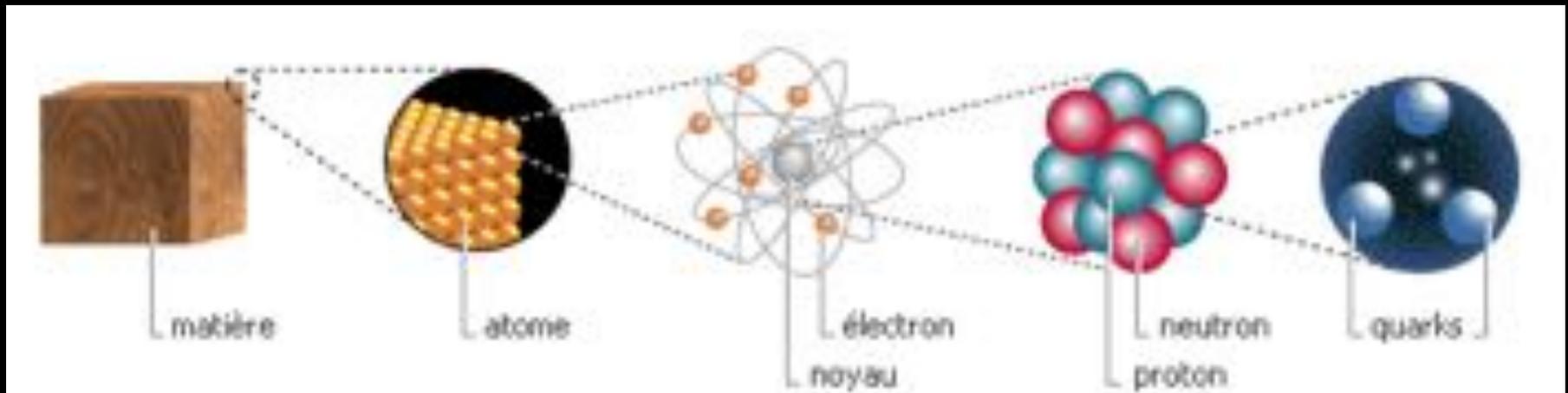


Qui subit l'expansion ?

L'expansion est un effet très faible à courte distance. Une force, même très faible, suffit à la stopper. Il y a au total quatre interactions fondamentales dans l'Univers susceptibles de jouer ce rôle.

- *L'interaction électromagnétique* : cohésion des atomes, des liaisons moléculaires, des structures cristallines, etc.
 - agit à toutes distances. En pratique les milieux sont électriquement neutres à grande échelle et l'interaction électromagnétique est alors négligeable.
 - moins intense que l'interaction forte, mais beaucoup plus que la gravité.
 - responsable de la cohésion de notre corps, de la roche de la croûte terrestre, ... A ces échelles, elle est beaucoup plus intense que la gravité.
 - toutes les structures ci-dessus ne sont donc pas sensibles à l'expansion.

Rappel : les constituants élémentaires de la matière (cf. cours n°2)



Qui subit l'expansion ?

L'expansion est un effet très faible à courte distance. Une force, même très faible, suffit à la stopper. Il y a au total quatre interactions fondamentales dans l'Univers susceptibles de jouer ce rôle.

- L'*interaction gravitationnelle* : cohésion du système solaire, de la galaxie, etc.
 - agit à toutes distances.
 - beaucoup moins intense que les *interaction forte* ou *électromagnétique*, mais domine aux grandes échelles où ces autres forces n'agissent plus.
 - Des structures comme une étoile, un système stellaire, un amas d'étoiles, une galaxie, un groupe de galaxies, ... sont liées par la gravité. Elles ne sont donc pas soumises à l'expansion.



- Bilan : l'expansion n'agit qu'aux distances intergalactiques !

Conséquences de l'expansion

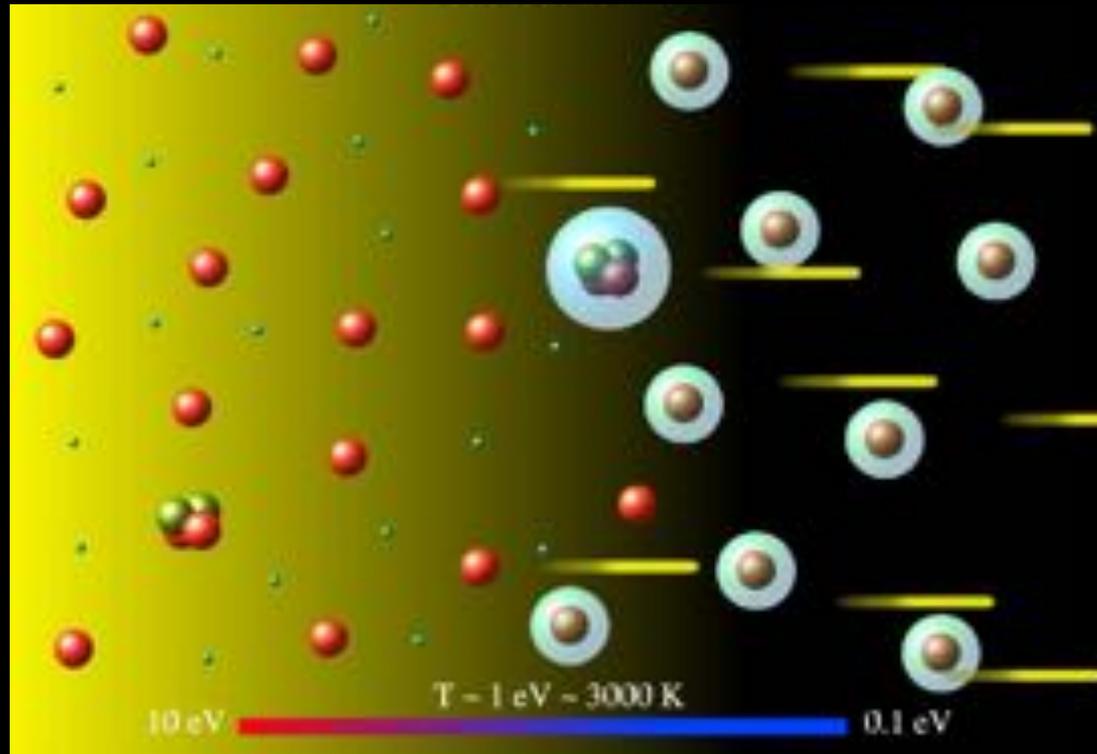
L'expansion implique que l'Univers était plus chaud et plus dense dans le passé.

- A une température et une densité donnée, certaines espèces sont stables, d'autres non.
- Exemple :
 - le gaz de cette pièce est sous forme moléculaire (N_2 , O_2 , CO_2 , ...).
 - A plus haute température, à causes des collisions nombreuses, les molécules seraient cassées et le gaz serait atomique : N, O, C, etc.
 - A encore plus haute température, les atomes eux-mêmes seraient séparés de leurs électrons. Le gaz serait ionisé (un plasma) : des noyaux N^{7+} , O^{8+} , C^{6+} , etc. et des électrons.
 - A des températures extrêmes, les noyaux eux-mêmes seraient cassés en nucléons (protons et neutrons).
 - Le cas ultime consiste en un plasma constitué uniquement de particules élémentaires : quarks, électrons, photons...
- L'Univers est passé par toutes ces étapes au cours de son refroidissement.

Le rayonnement fossile

Quand on remonte dans le passé, la première grande transition a lieu vers 380 000 ans après le *Big Bang*. L'Univers passe d'un état ionisé à un état neutre (période de *recombinaison*). Sa température est alors de l'ordre de 3000 K.

- A plus haute température, à chaque fois qu'un électron et un noyau se rencontrent pour former un atome, il émet un photon qui va immédiatement casser un autre atome : l'Univers reste ionisé.
- A plus basse température, les photons ne sont plus assez énergétiques pour casser les atomes. L'Univers reste neutre.
- A partir de ce moment là, les photons n'interagissant plus avec la matière sont *découplés* : ils ne font que se refroidir du fait de l'expansion.
- L'Univers baigne donc dans ce *rayonnement fossile*.



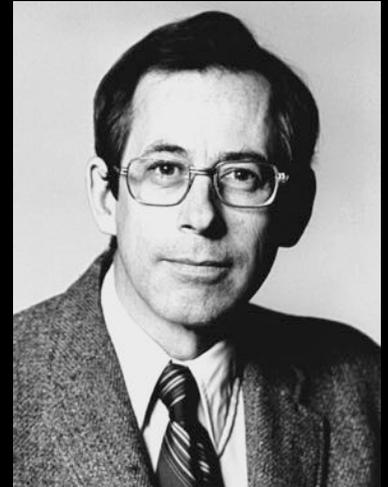
Le rayonnement fossile

Quand on remonte dans le passé, la première grande transition a lieu vers 380 000 ans après le *Big Bang*. L'Univers passe d'un état ionisé à un état neutre (période de *recombinaison*). Sa température est alors de l'ordre de 3000 K.

- Le *rayonnement fossile* a été prédit par Gamow en 1940.
- Il a été découvert par Penzias & Wilson en 1965.
- Il a été alors interprété par Peebles.
- Premières observations précises : satellite COBE (1993). La température mesurée est 2,73 K ! Cette température est la même, au cent-millième près, dans toutes les directions. L'Univers est bien isotrope !
- Observations encore plus récentes : WMAP & Planck. De très légères anisotropies sont mises en évidence...



G. Gamow (1904-1968)



J. Peebles (1935-)

Le rayonnement fossile est le second pilier de la cosmologie moderne. Depuis sa découverte, la théorie du *Big Bang* s'est rapidement imposée.

Le rayonnement fossile

La découverte du rayonnement fossile a eu lieu de manière assez fortuite.



Penzias et Wilson, 1961.

Les prix Nobel de l'astrophysique...

Prix Nobel de Physique 1978 :



« for their discovery of cosmic microwave background radiation »

(la même année : Pyotr Leonidovich Kapitsa « for his basic inventions and discoveries in the area of low-temperature physics »)



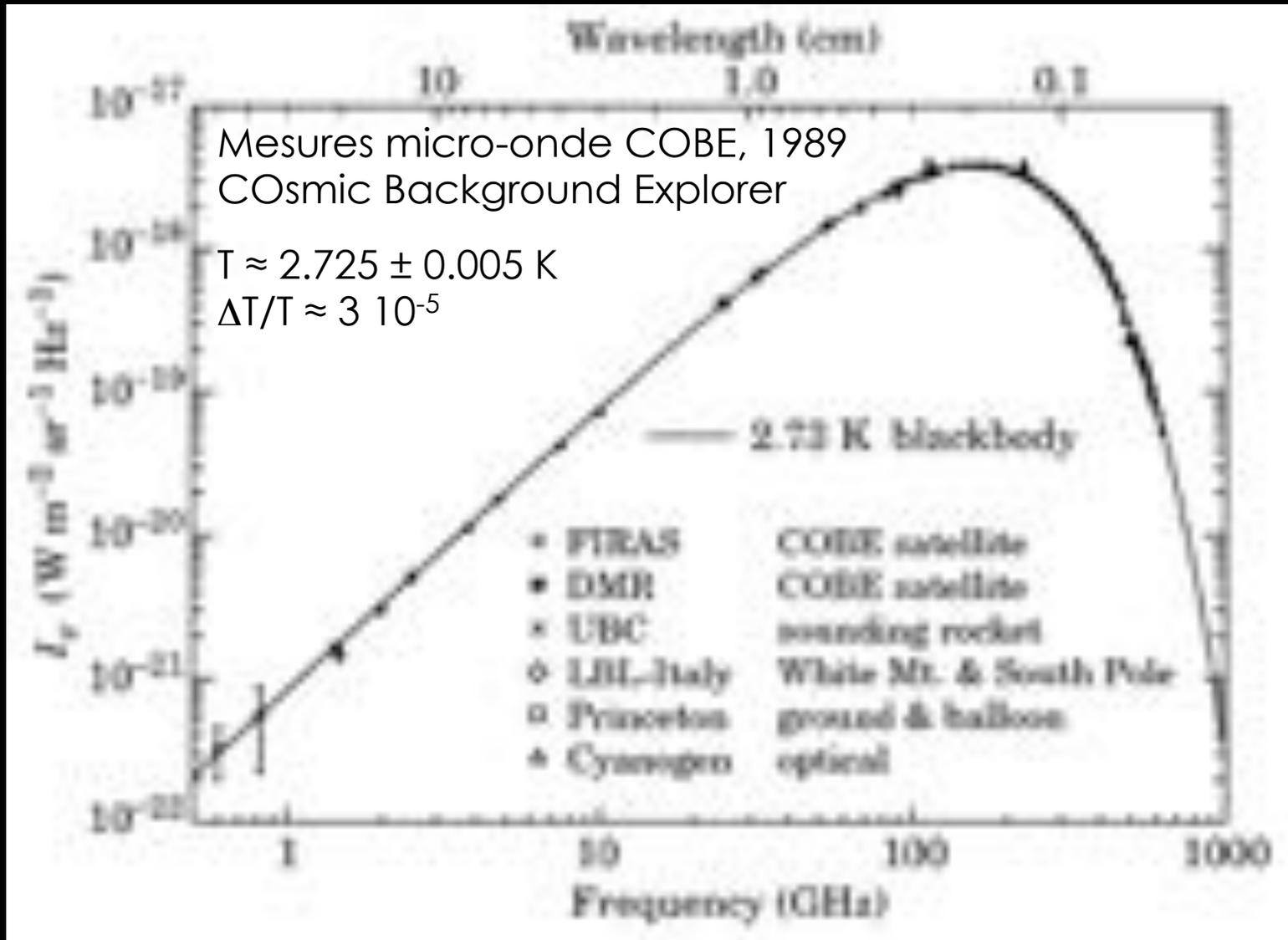
Arno Allan Penzias



Robert Woodrow Wilson

Le rayonnement fossile

Le rayonnement fossile apparaît comme un corps noir parfait à 2,73 K.



Les prix Nobel de l'astrophysique...

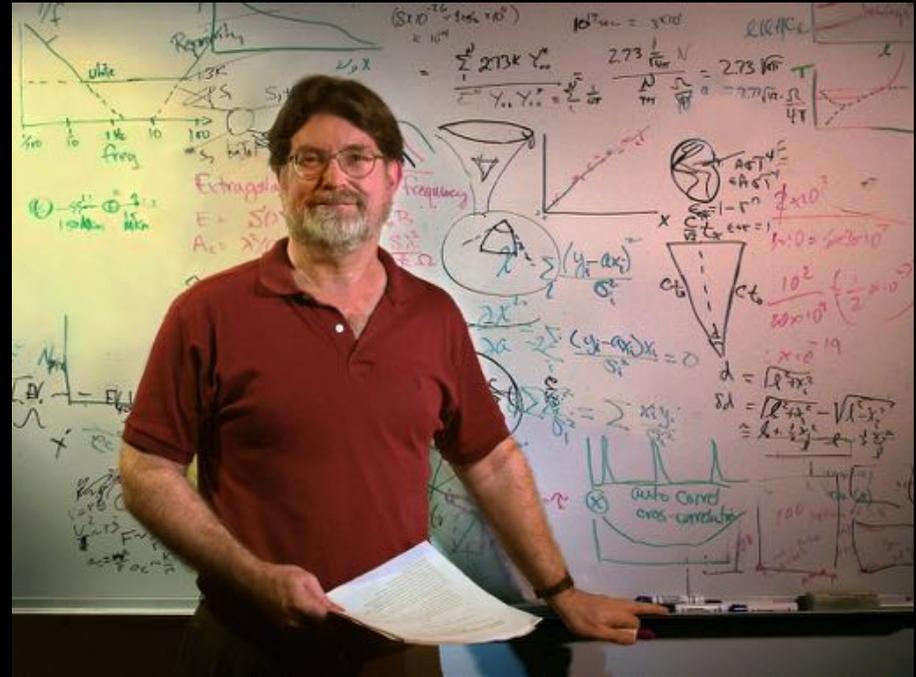
Prix Nobel de Physique 2006 :



« for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation »



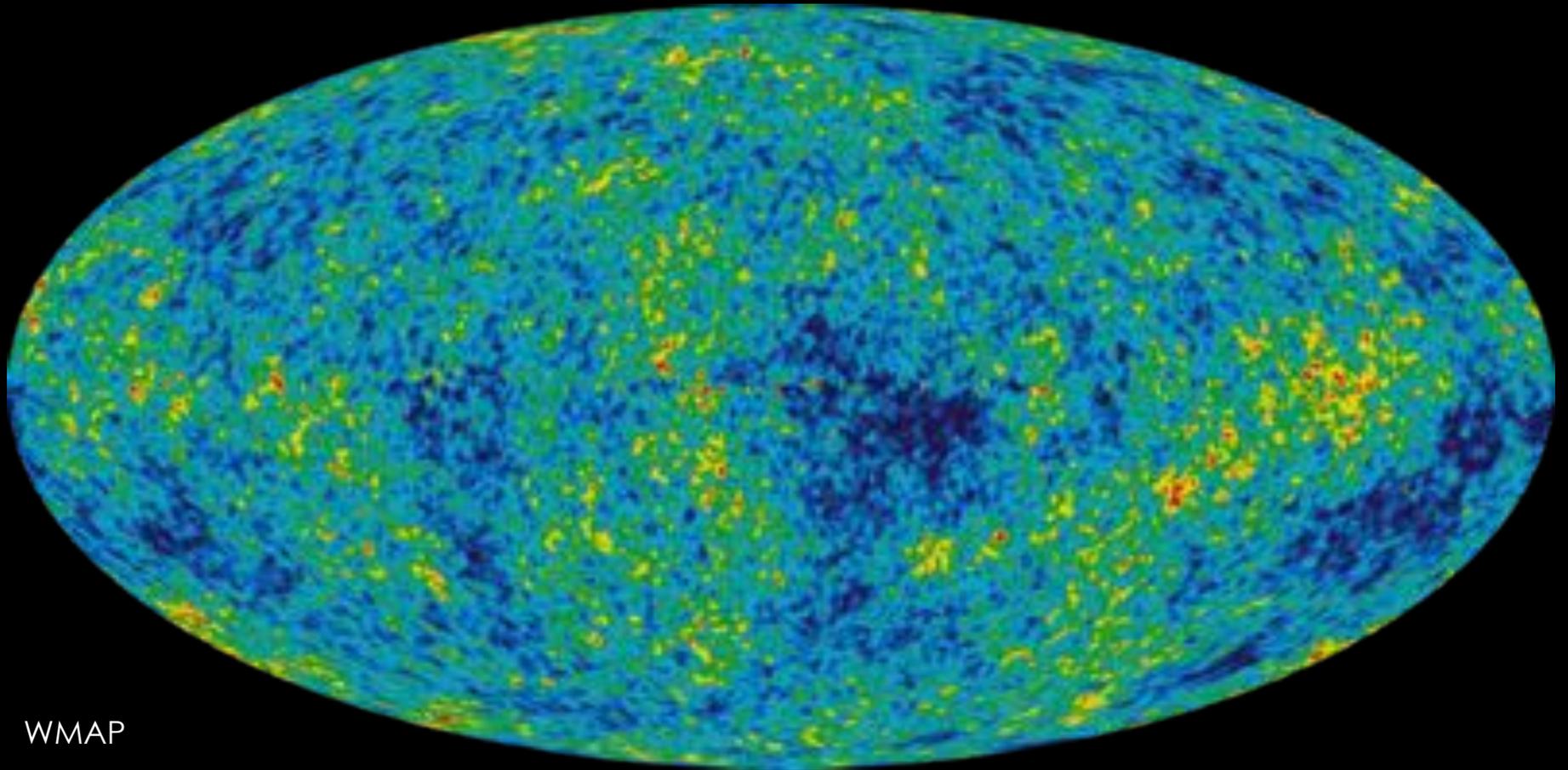
John C. Mather



George F. Smoot

Les anisotropies du rayonnement fossile

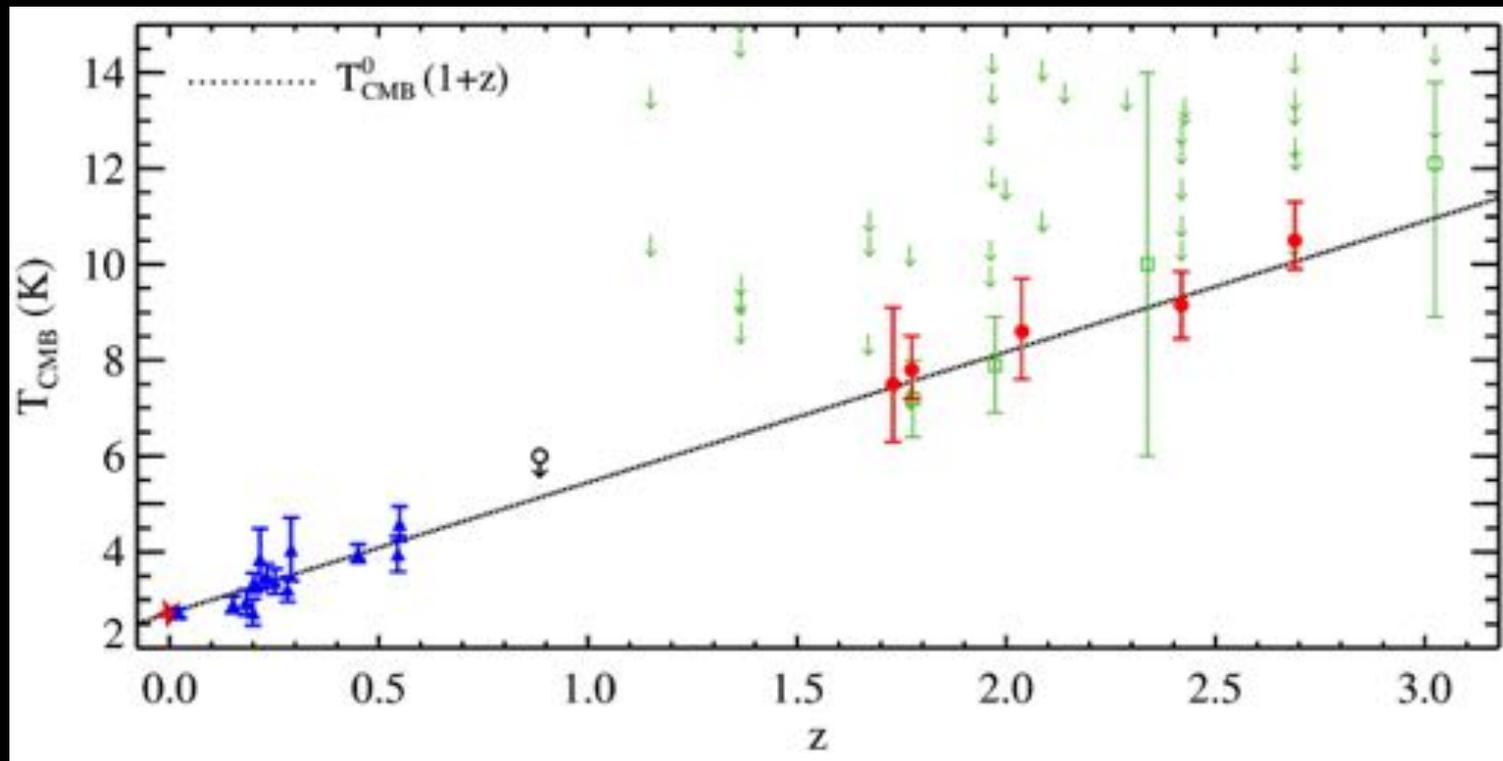
La température varie d'une direction à l'autre. Ces variations sont de l'ordre de 0,005 % seulement !



WMAP

La loi de refroidissement du rayonnement fossile

En détectant la molécule CO dans des quasars lointains, une équipe de l'IAP a pu mesurer la température du rayonnement fossile dans le passé. En effet, cette molécule est excitée radiativement et les raies dans le spectre observé du quasar contiennent donc la marque du bain de photon présent au niveau de la source. La température suit exactement la loi de refroidissement prédite par la théorie du *Big Bang*.



Le paradoxe d'Olbers

Pourquoi la nuit est noire ?

- Kepler (1610), de Chéseaux (1743), Olbers (1823) : dans un Univers statique et infini, le ciel devrait être uniformément brillant.

En effet, dans chaque direction, on finit par rencontrer une étoile.

[La brillance de surface d'une étoile est indépendante de la distance]

- Solutions proposées avant la cosmologie moderne :
 - Univers fini, ou nombre fini d'étoiles (Kepler)
 - Univers a un âge fini + vitesse de la lumière finie : l'Univers est encore jeune (E. Allan Poe, *Eureka*, 1848 - F. Arago, *Astronomie populaire*, 1850)
- Théorie du *Big Bang* :
 - Un peu la solution ci-dessus : effet d'horizon
 - En fait le ciel est uniformément brillant : rayonnement fossile – mais la lumière correspondante est très décalée vers le rouge.
 - Contrairement à l'argument de Poe : dans un Univers plus jeune, le ciel est plus uniformément brillant dans le domaine visible...

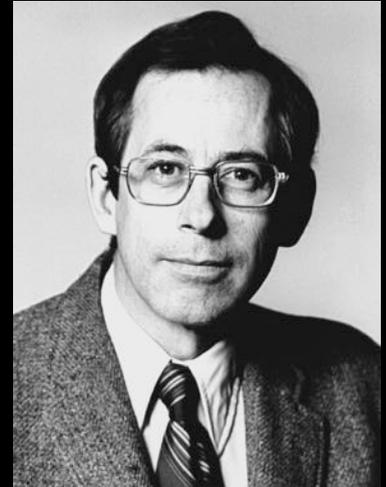
La nucléosynthèse primordiale

Encore plus dans le passé, dans un Univers encore plus chaud, a eu lieu une autre transition très importante : la *nucléosynthèse primordiale*, c'est à dire la formation des premiers noyaux. Elle a lieu 3 minutes après le *Big Bang*, à des températures de l'ordre du milliard de degrés !

- Avant, les noyaux sont rares car ils sont immédiatement cassés par une autre particule.
- La nucléosynthèse primordiale a été prédite en même temps que le rayonnement fossile par Gamow (1940).
- Ses calculs étaient peu précis car les sections efficaces nucléaires nécessaires n'étaient pas encore mesurées à l'époque.
- Il avait cependant prédit que les deux noyaux formés les plus abondants étaient H et He.
- Le premier calcul précis est dû à Peebles (1966).
- En accord avec les observations, il se forme environ 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium (en masse), des traces de deutérium, hélium 3 et lithium 7. Rien d'autre...



G. Gamow (1904-1968)



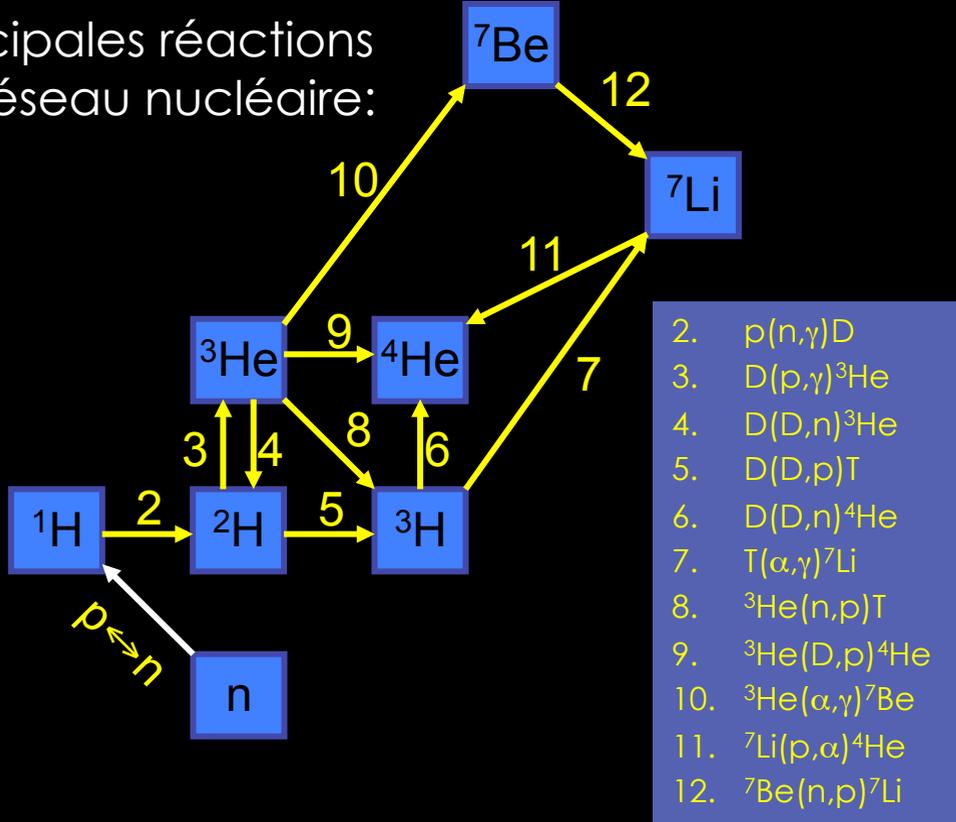
J. Peebles (1935-)

La nucléosynthèse primordiale est le 3^{ème} pilier du *Big Bang*.

La nucléosynthèse primordiale

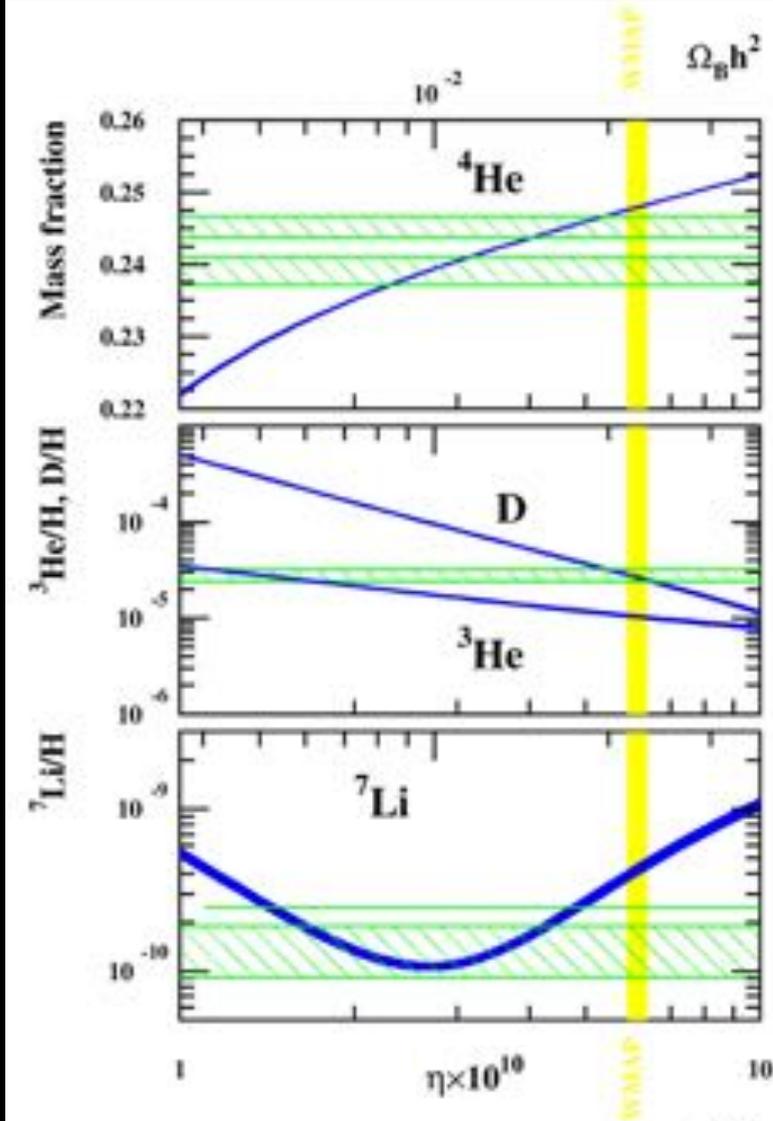
Un exemple de calcul détaillé (E. Vangioni et al. 2003, IAP).

Principales réactions du réseau nucléaire:



Principaux noyaux formés :

- Hydrogène : 1H [environ 75 % en masse]
- Hélium : 4He [environ 25 % en masse]
- Deutérium : 2H
- Hélium 3 : 3He [inclut 3H car désintégration β]
- Lithium : 7Li [inclut 7Be car désintégration β]

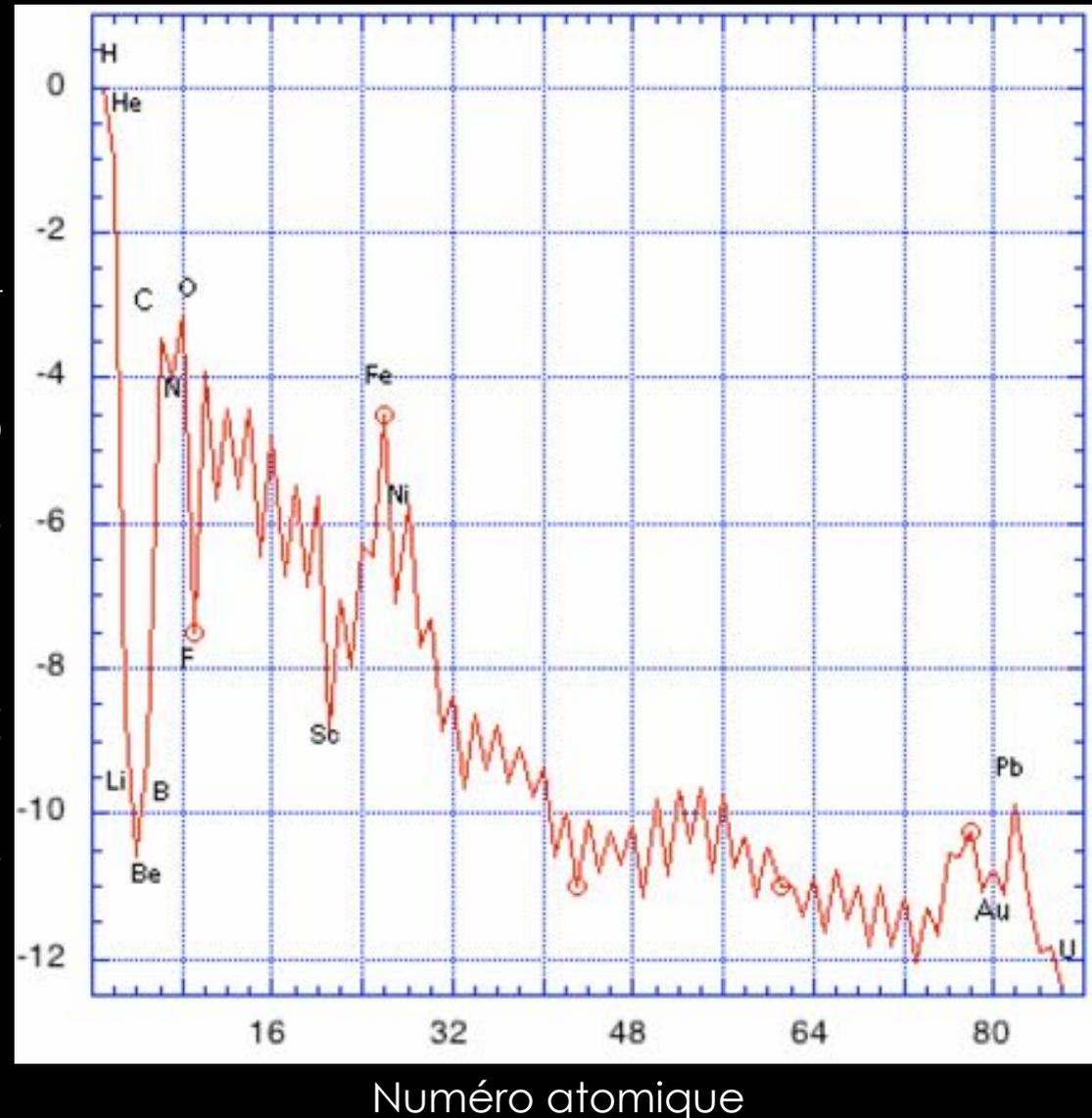


La composition chimique actuelle de l'Univers

La composition chimique actuelle de l'Univers est le fruit de différentes nucléosynthèses :

- Primordiale (H, He)
- Spallative (LiBeB)
(cf. cours n°9)
- Stellaire (de C à Fe, Ni)
(cf. cours n°6)
- Explosive (noyaux lourds)
(cf. cours n°7)

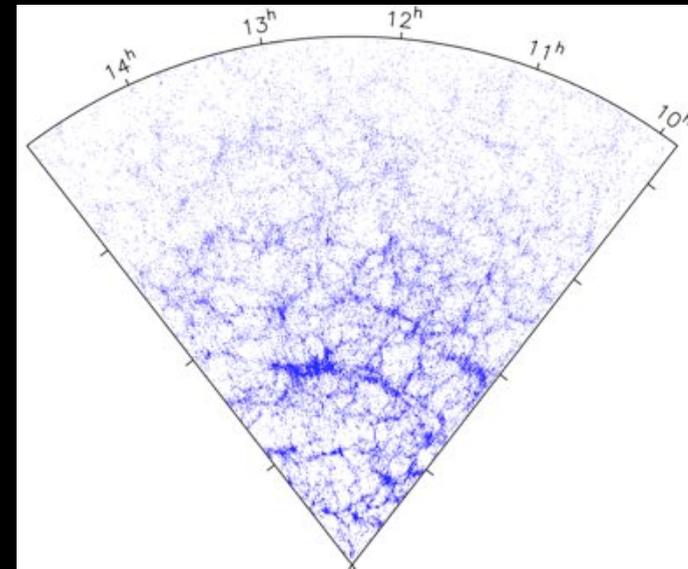
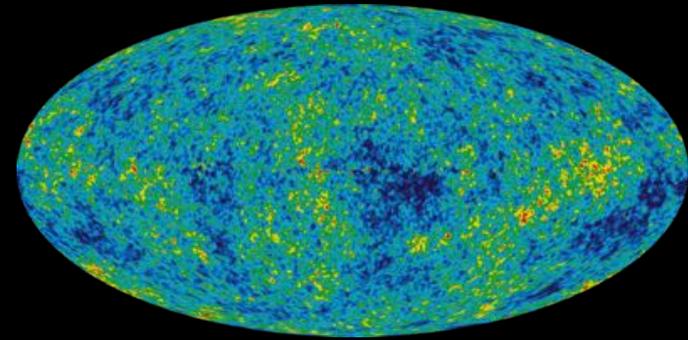
Logarithme de l'abondance
par rapport à l'hydrogène N_i / H



L'Univers inhomogène

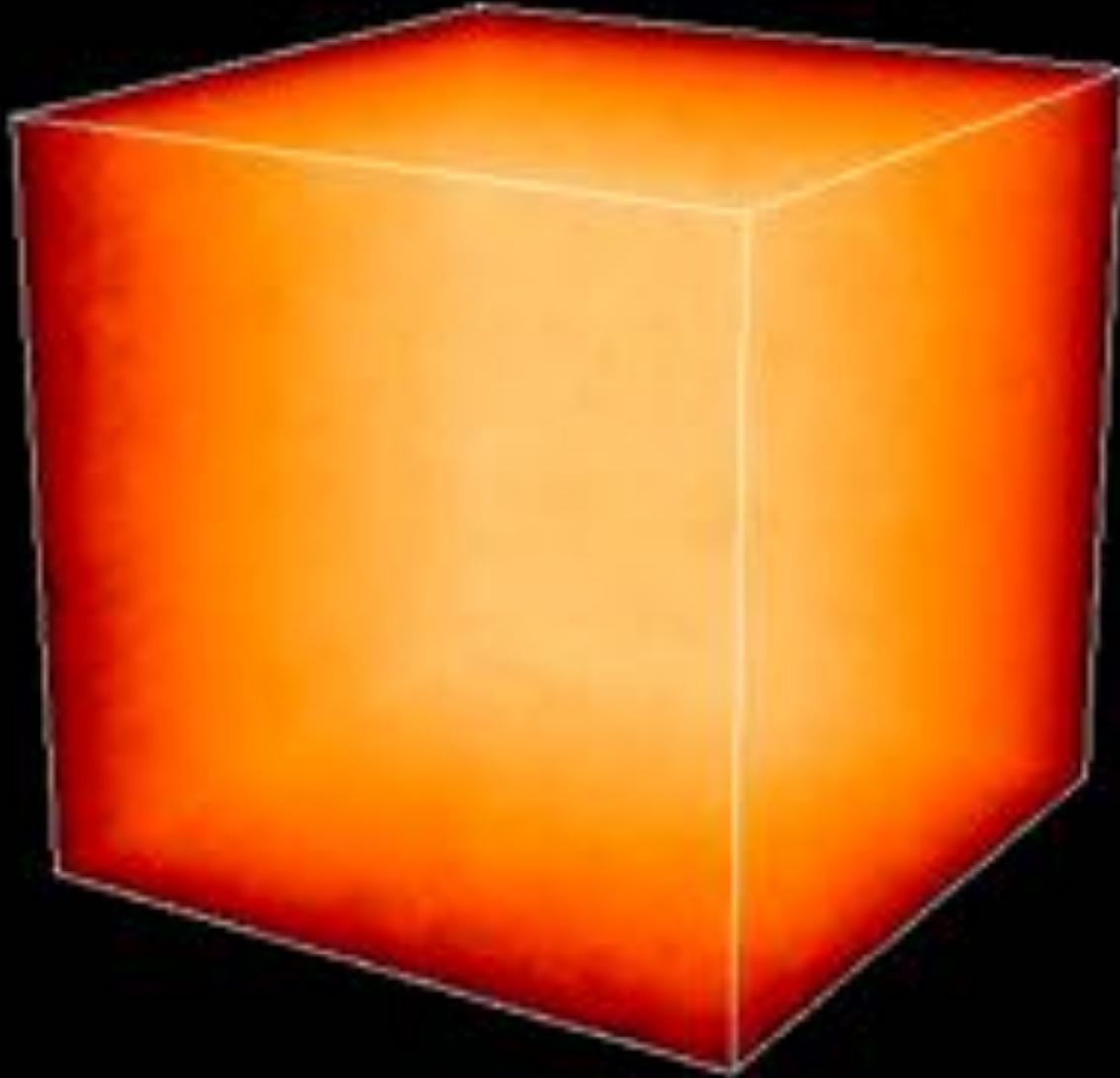
Localement, l'Univers est fortement inhomogène. Comment les structures denses se sont-elles formées ?

- Les petites anisotropies du rayonnement fossile nous indiquent que même très jeune (380 000 ans), l'Univers n'était pas parfaitement homogène.
- Si de très faibles inhomogénéités sont présentes juste après le *Big Bang*, la gravité est un moteur puissant pour les amplifier au cours du temps.
 - Les régions denses attirent la matière des régions diluées
 - Les régions denses sont donc de plus en plus denses et concentrées. Elles occupent une toute petite fraction du volume mais contiennent l'essentiel de la masse.
 - Les régions diluées sont de plus en plus diluées et forment de grands vides dans l'Univers.
- La matière noire étant majoritaire, c'est elle qui domine cette évolution.
- La structuration de l'Univers (galaxies, groupes, amas, grandes structures) est due à ce mécanisme.



Formation des structures

Evolution de la matière noire depuis $t = 50$ millions d'années jusqu'à aujourd'hui.



Simulation numérique (Colombi et al., IAP) - <http://www.projet-horizon.fr/>

Formation des structures

La matière noire
à $t \sim 2.7$ Gyr.

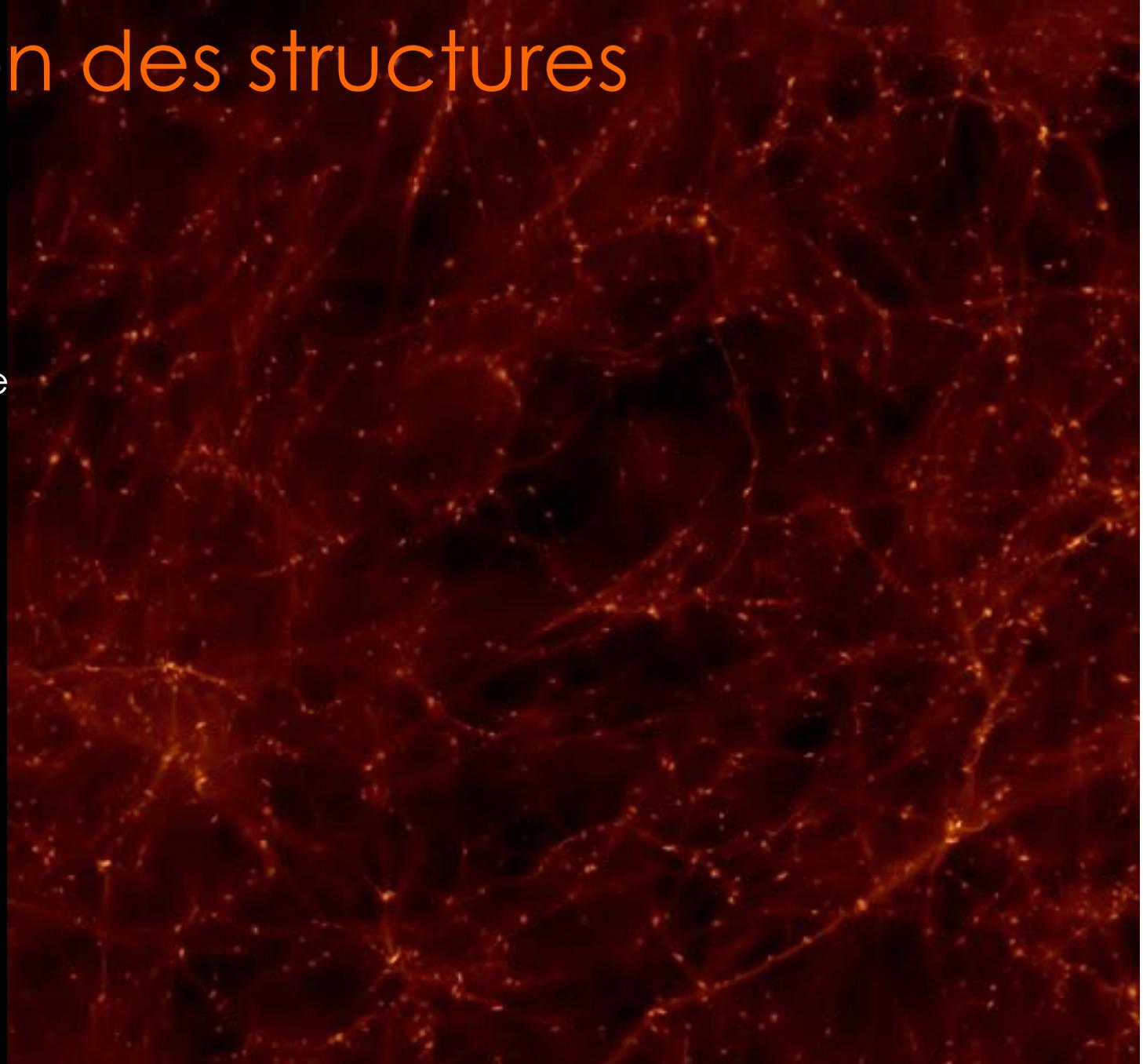
La couleur code
la densité de
matière noire



Formation des structures

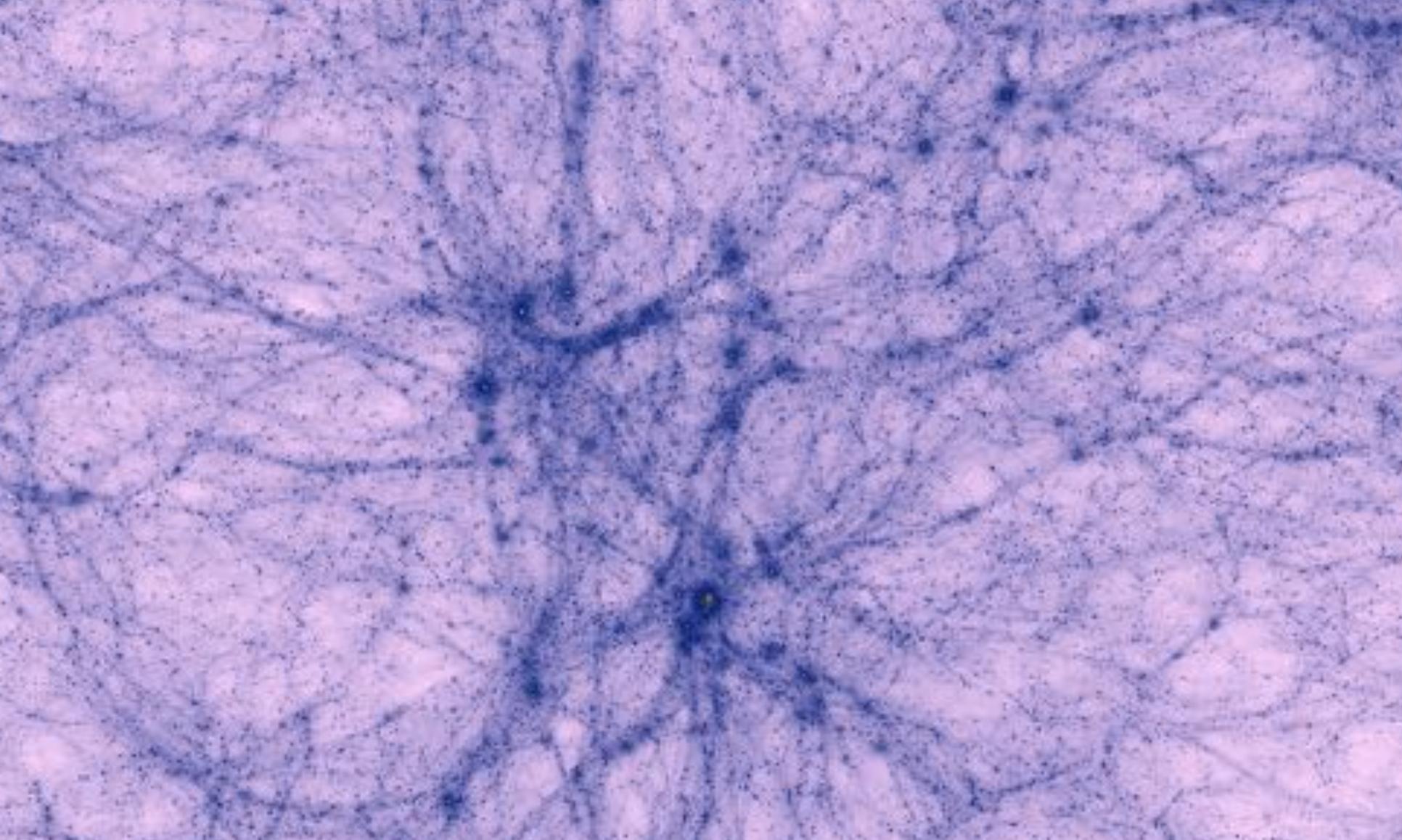
La matière
baryonique
à $t \sim 2.7$ Gyr.

La couleur code
la densité de
matière baryonique



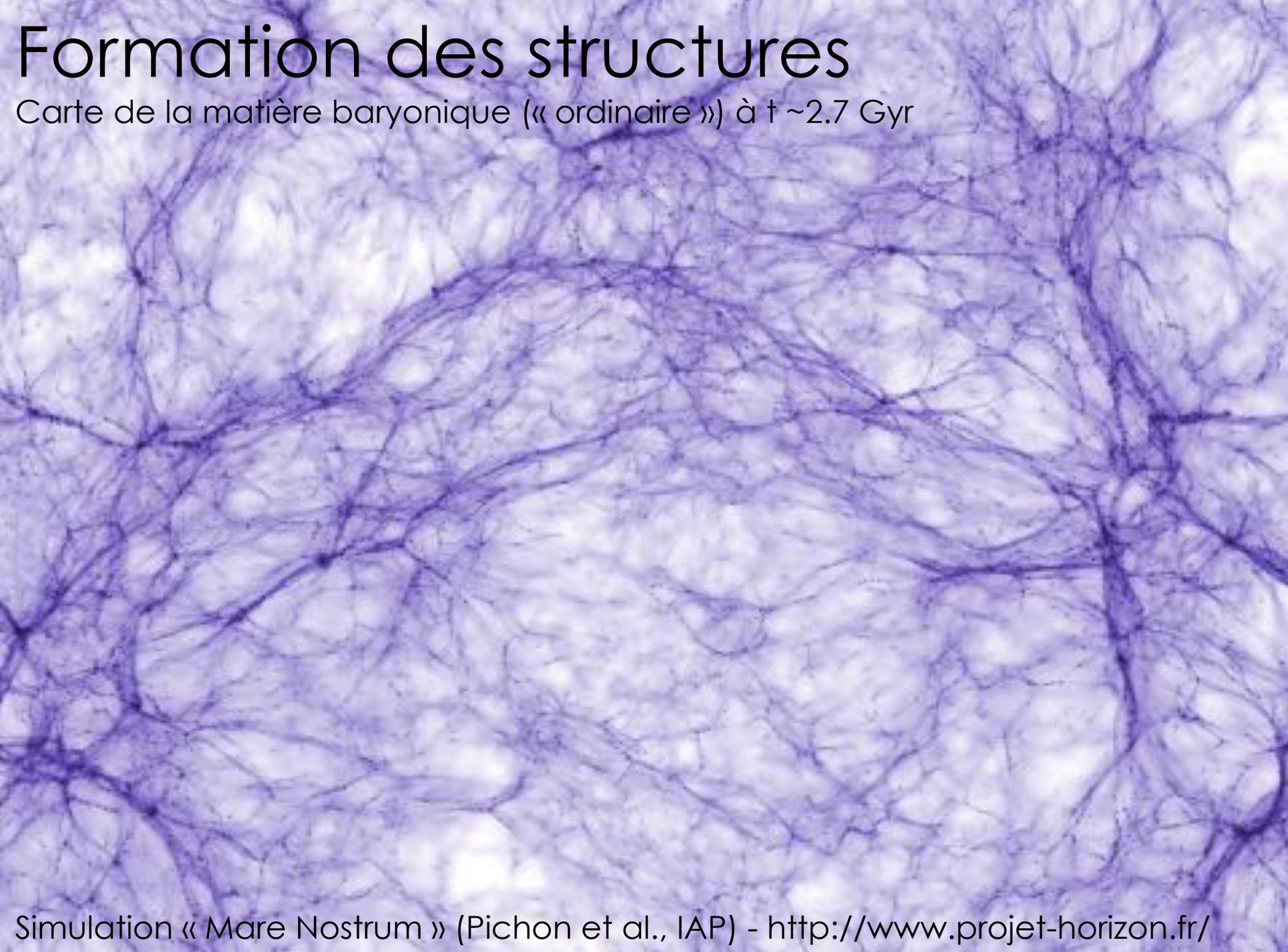
Formation des structures

Carte de la matière noire à $t \sim 4.1$ Gyr



Formation des structures

Carte de la matière baryonique (« ordinaire ») à $t \sim 2.7$ Gyr



Simulation « Mare Nostrum » (Pichon et al., IAP) - <http://www.projet-horizon.fr/>

Formation des structures

Carte de la matière visible à $t \sim 2.8$ Gyr



Simulation « Mare Nostrum » (Pichon et al., IAP) - <http://www.projet-horizon.fr/>

Formation des structures

Carte de la matière visible à $t \sim 2.8$ Gyr

Quelques « galaxies » apparues dans la simulation :

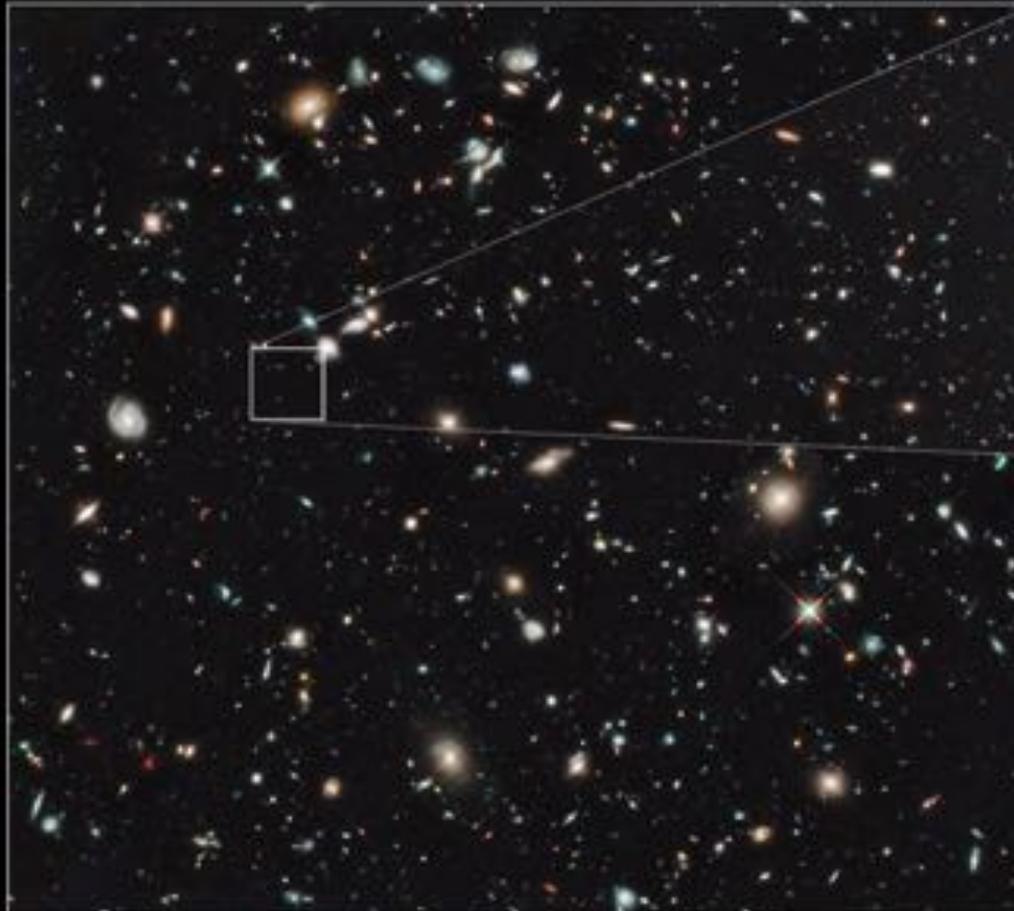


Formation des galaxies

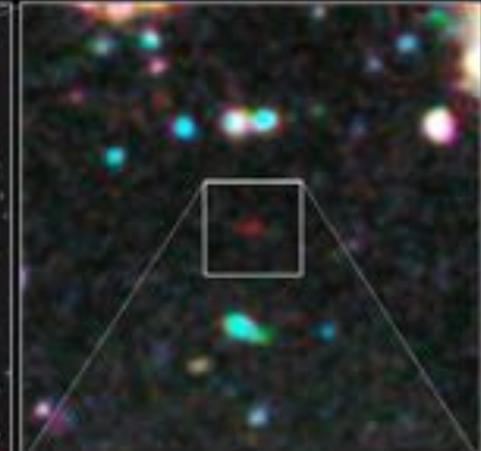
Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Tout d'abord de petites proto-galaxies à disque.

Hubble Ultra Deep Field 2009-2010



Hubble Space Telescope • WFC3/IR



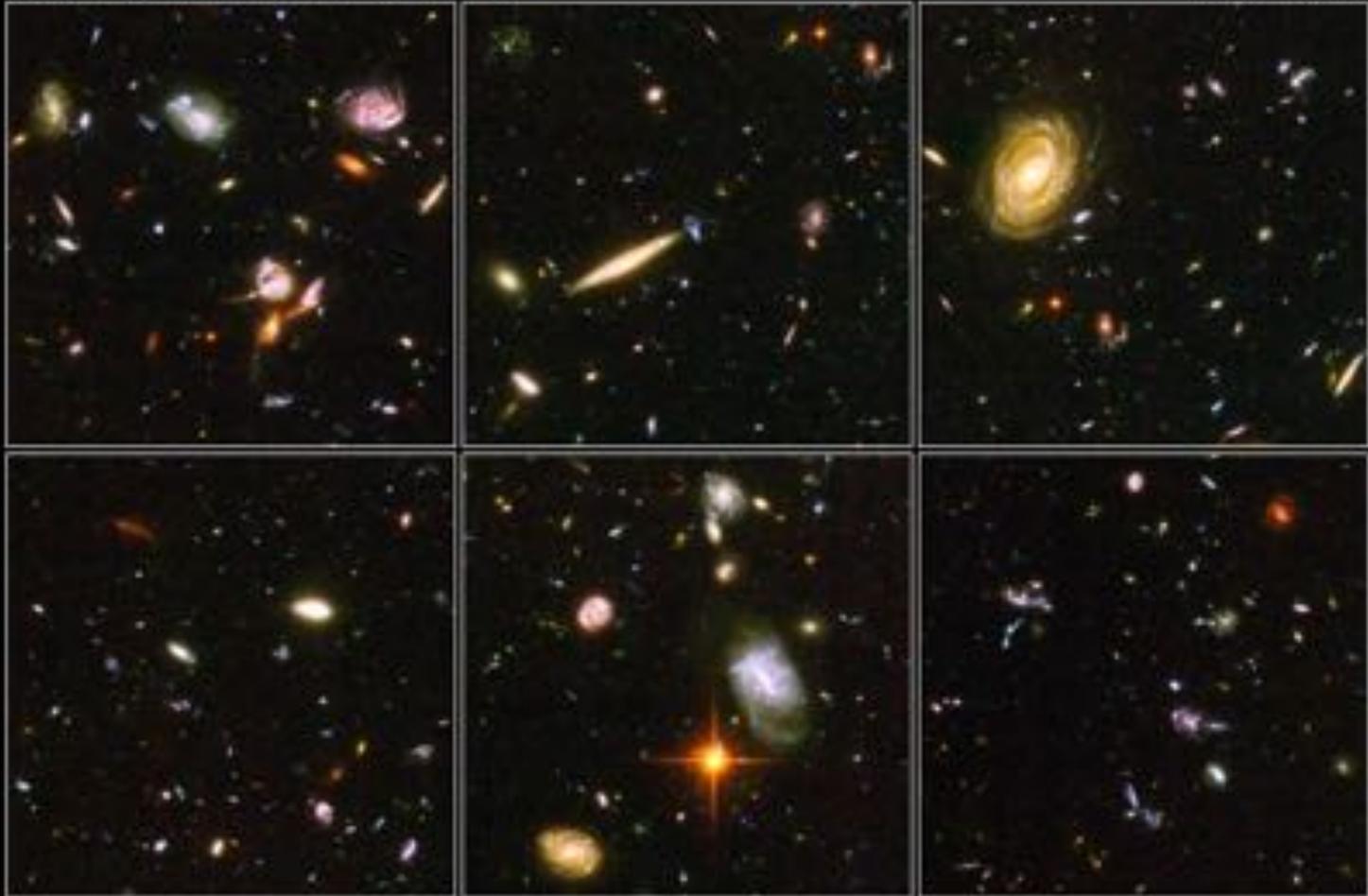
Formation des galaxies

Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Tout d'abord de petites proto-galaxies à disque.
- Ensuite des galaxies plus grosses : croissance par accrétion et par fusion

Hubble Ultra Deep Field Details

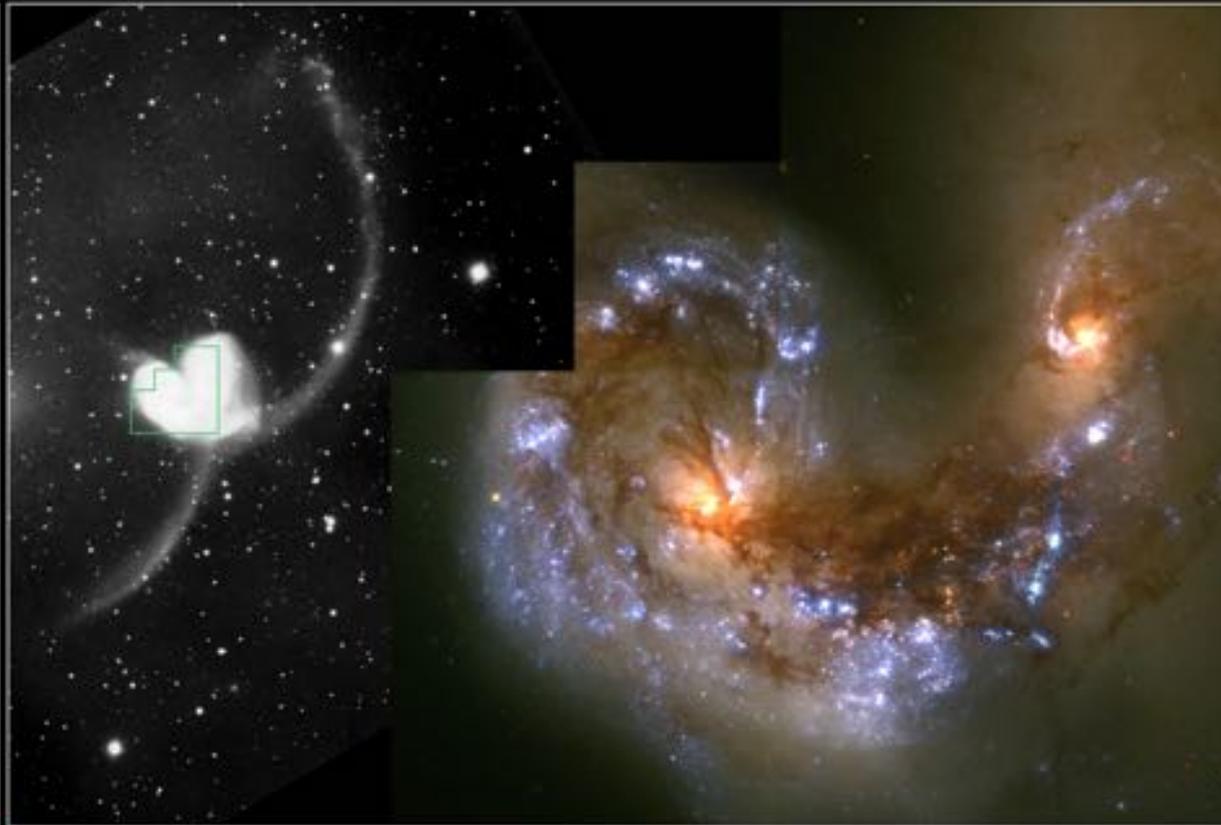
HST • ACS



Formation des galaxies

Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Tout d'abord de petites proto-galaxies à disque.
- Ensuite des galaxies plus grosses : croissance par accrétion et par fusion

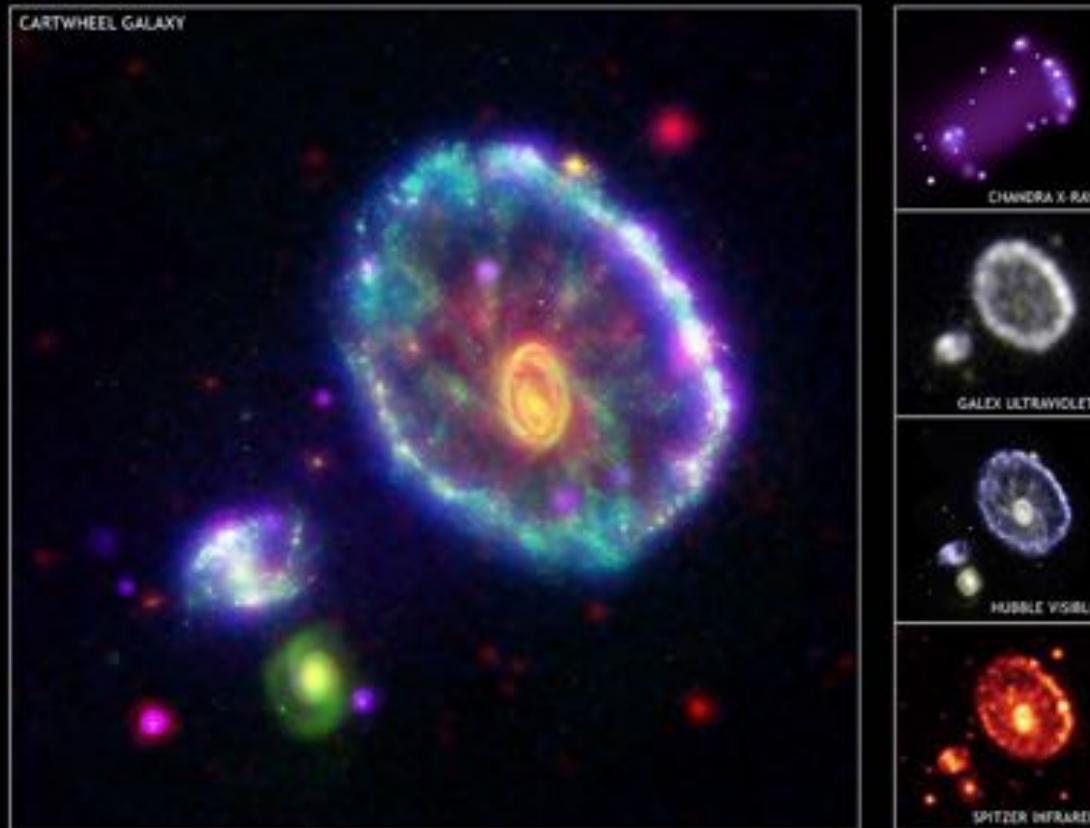


Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

Formation des galaxies

Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Tout d'abord de petites proto-galaxies à disque.
- Ensuite des galaxies plus grosses : croissance par accrétion et par fusion



Formation des galaxies

Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Tout d'abord de petites proto-galaxies à disque.
- Ensuite des galaxies plus grosses : croissance par accrétion et par fusion



Galaxies NGC 2207 and IC 2163

Formation des galaxies

Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Les grosses galaxies elliptiques apparaissent au cœur des amas, où les fusions sont très fréquentes.



Galaxie elliptique
géante

Formation des galaxies

Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Les grosses galaxies elliptiques apparaissent au cœur des amas, où les fusions sont très fréquentes.



M87 (AAO)

Formation des galaxies

Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

- Les grosses galaxies elliptiques apparaissent au cœur des amas, où les fusions sont très fréquentes.

- Les grandes galaxies spirales sont dans des régions plus isolées.



M87 (AAO)

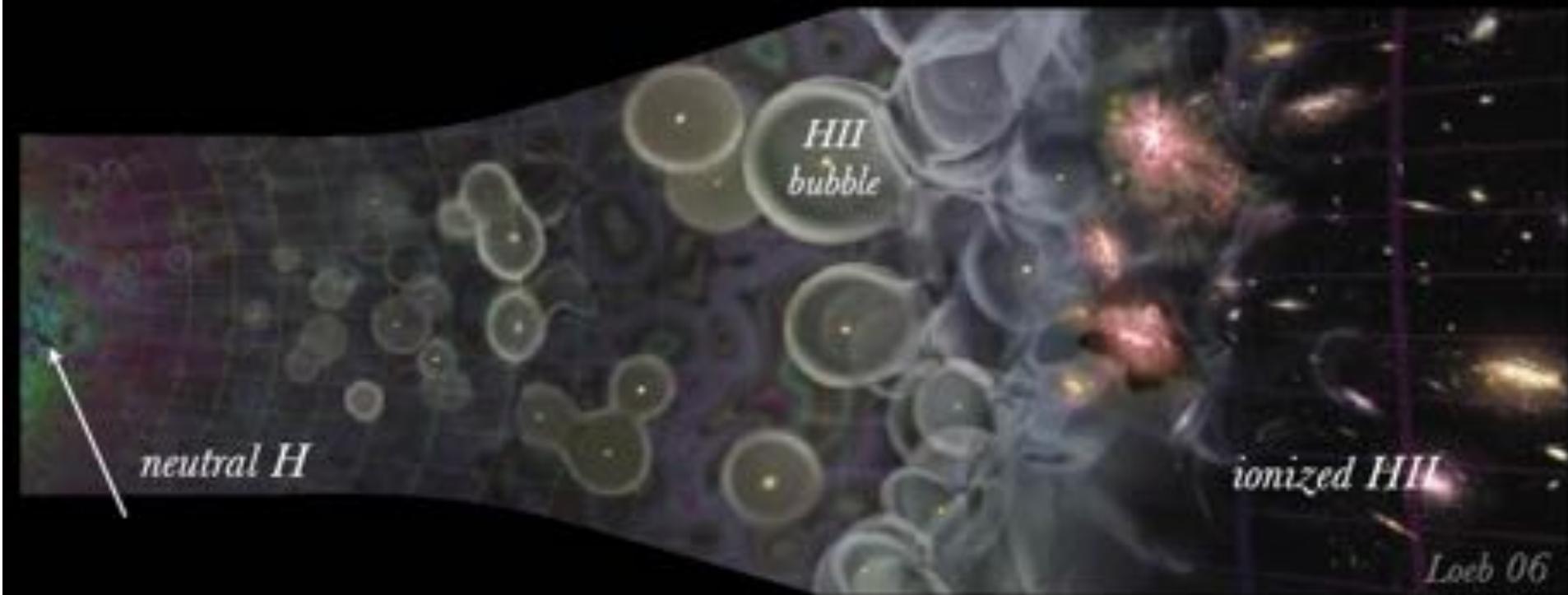


NGC 1232 (VLT)

La réionisation

Après la *recombinaison* et l'émission du rayonnement fossile ($t \sim 380\,000$ ans), l'Univers est neutre, composé essentiellement d'hydrogène et d'hélium.

- *Âges sombres* : après la *recombinaison*, rien ne se passe, à part la formation progressive de structures de plus en plus denses.
- Premières étoiles (fin des *âges sombres*) :
 - La lumière des étoiles peut ioniser H & He : c'est l'époque de *réionisation*.
 - L'évolution chimique commence, avec l'apparition de noyaux plus lourds.
 - C'est le début de l'Univers tel que nous le connaissons.

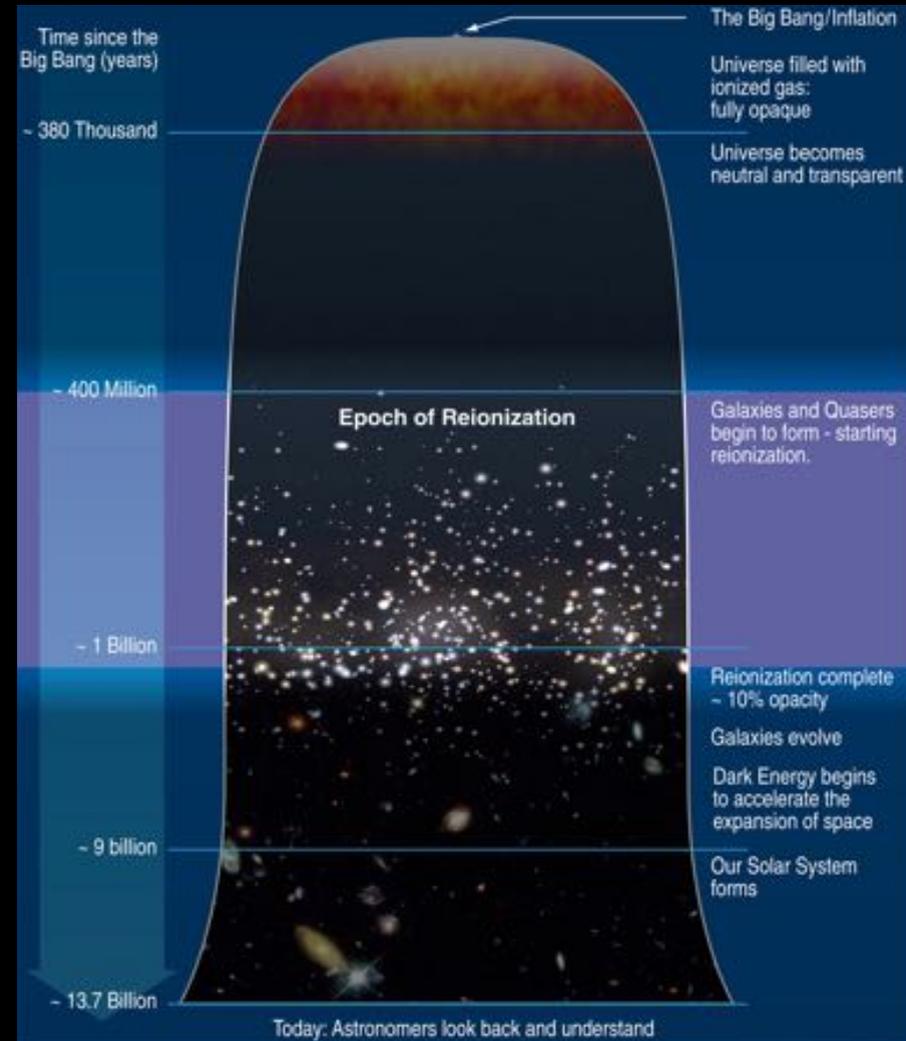


Repousser l'horizon observationnel

Si on oublie le cas particulier du rayonnement fossile émis à $t \sim 380\,000$ ans, nos instruments actuels ne permettent pas encore de sonder les confins de notre horizon observationnel théorique (galaxie la plus lointaine observée : $t \sim 500$ millions d'années). Comment progresser ?

- Construire des instruments encore plus sensibles dans des domaines spectraux adaptés aux sources lointaines, très décalées vers le rouge (ELT, JWST, SKA). (→ cours n°12)

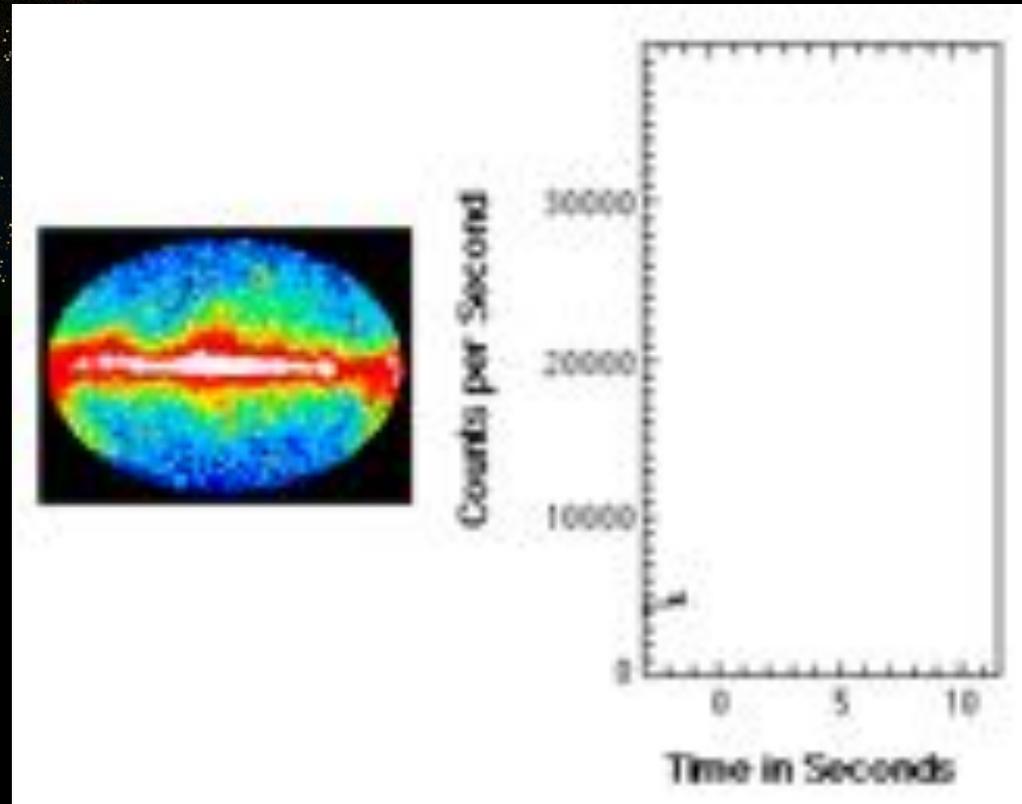
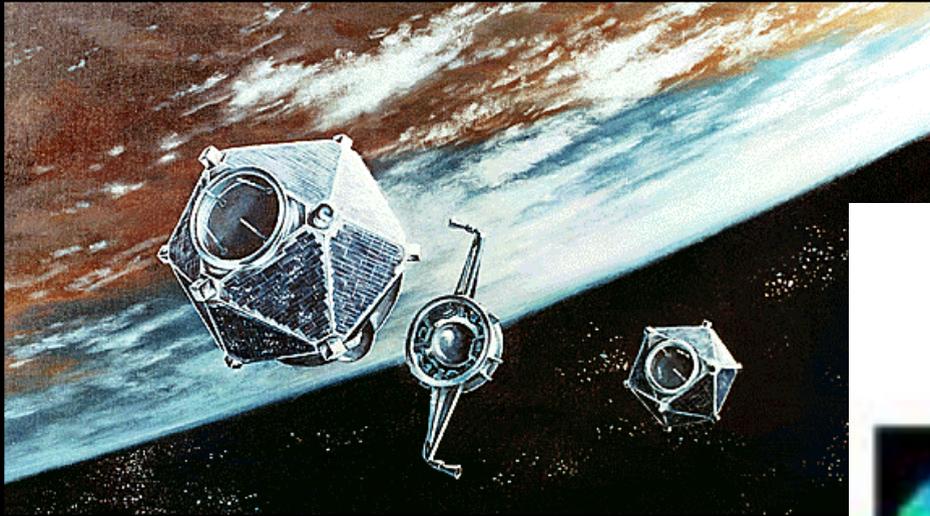
- Utiliser les sources les plus brillantes que l'on peut déjà détecter à très grande distance. Exemple : les *sursauts gamma*.



Les sursauts gamma

Les sursauts gamma sont des phénomènes très énergétiques, sans doute associés à la naissance d'un trou noir par l'effondrement gravitationnel d'une étoile très massive.

- Découverte fortuite à la fin des années 60 par les satellites militaires US Vela



**Treaty Banning Nuclear Weapon Tests in the Atmosphere, in Outer Space and under Water
Signed by the Original Parties, the Union of Soviet Socialist Republics, the United Kingdom of Great Britain
and Northern Ireland and the United States of America at Moscow: 5 August 1963**

The Governments of the United States of America, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, and the Union of Soviet Socialist Republics, hereinafter referred to as the "Original Parties,"

Proclaiming as their principal aim the speediest possible achievement of an agreement on general and complete disarmament under strict international control in accordance with the objectives of the United Nations which would put an end to the armaments race and eliminate the incentive to the production and testing of all kinds of weapons, including nuclear weapons,

Seeking to achieve the discontinuance of all test explosions of nuclear weapons for all time, determined to continue negotiations to this end, and desiring to put an end to the contamination of man's environment by radioactive substances,

Have agreed as follows:

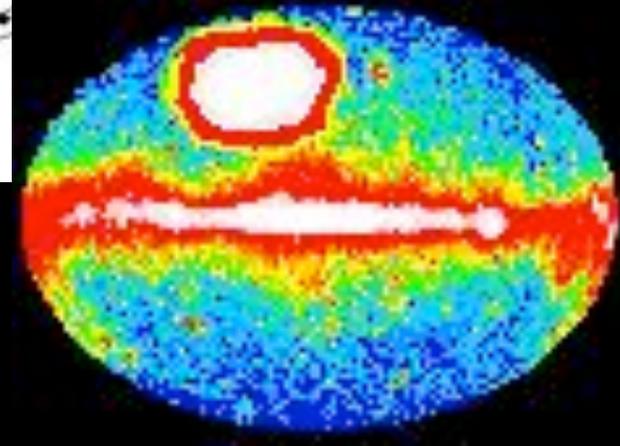
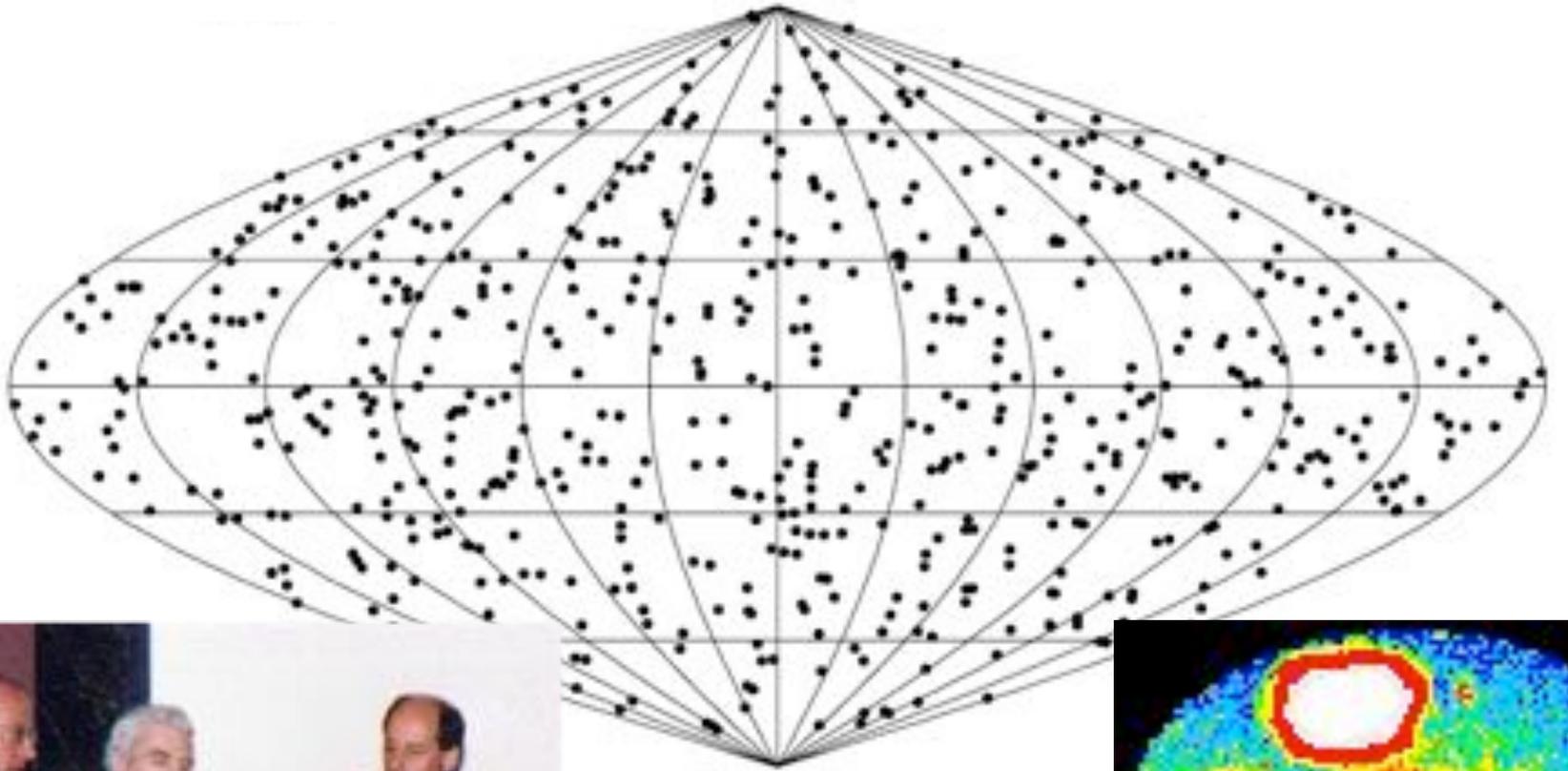
Article I

1. Each of the Parties to this Treaty undertakes to prohibit, to prevent, and not to carry out any nuclear weapon test explosion, or any other nuclear explosion, at any place under its jurisdiction or control:

(a) in the atmosphere; beyond its limits, including outer space; or under water, including territorial waters or high seas; or

Galactique ou extra-galactique ?

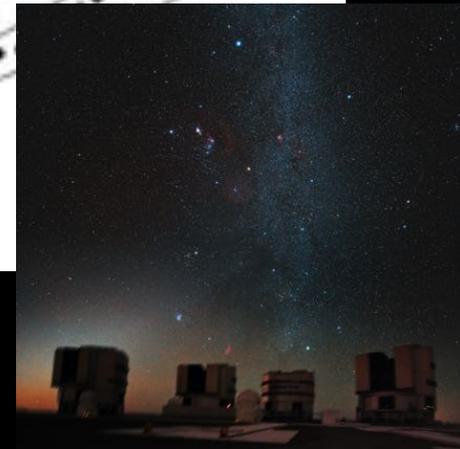
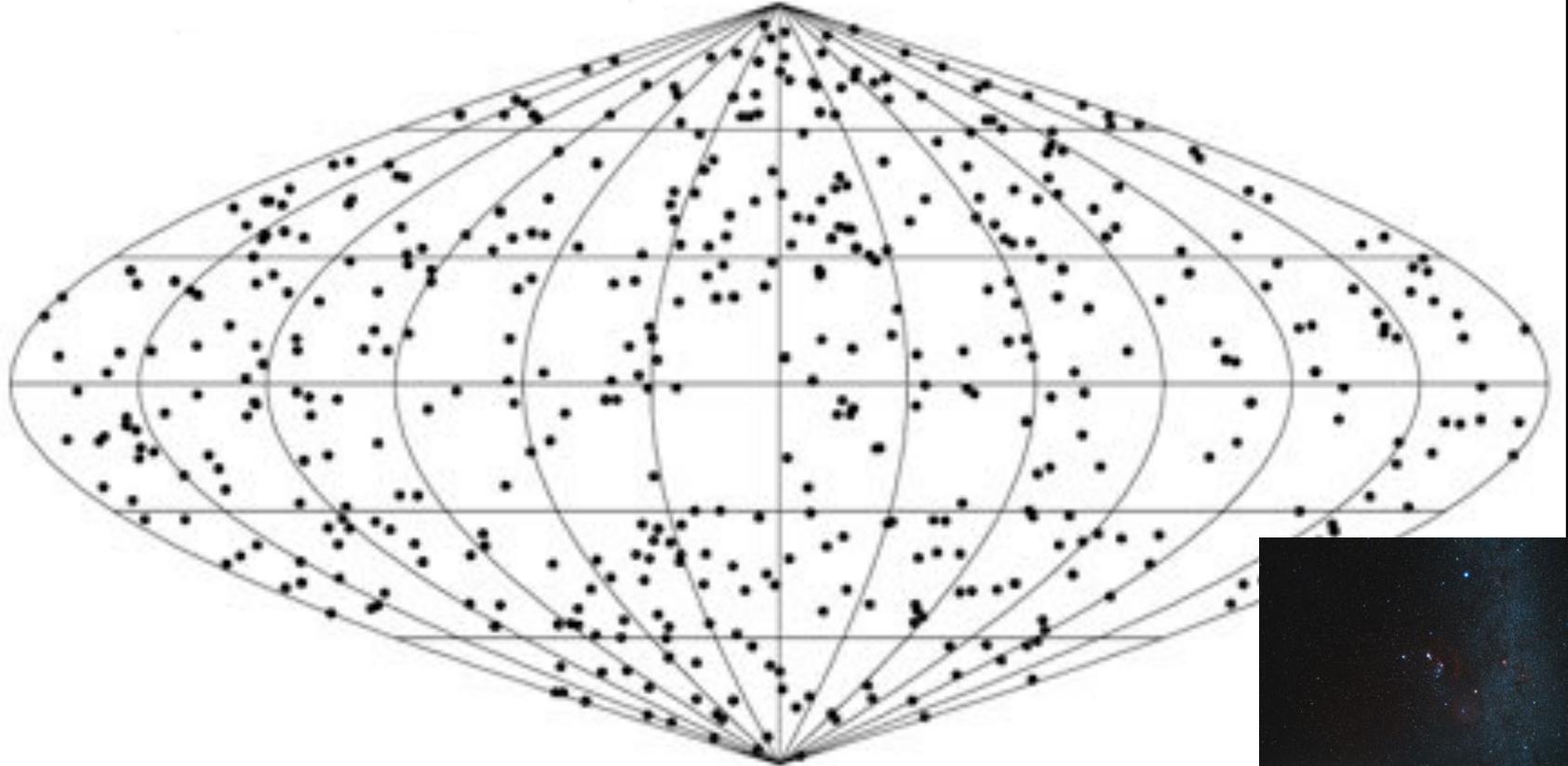
Carte des sursauts gamma (BATSE, 1994)



Paczynski, Rees & Lamb, 1994

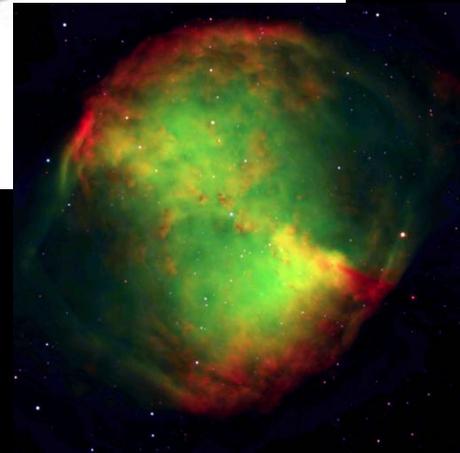
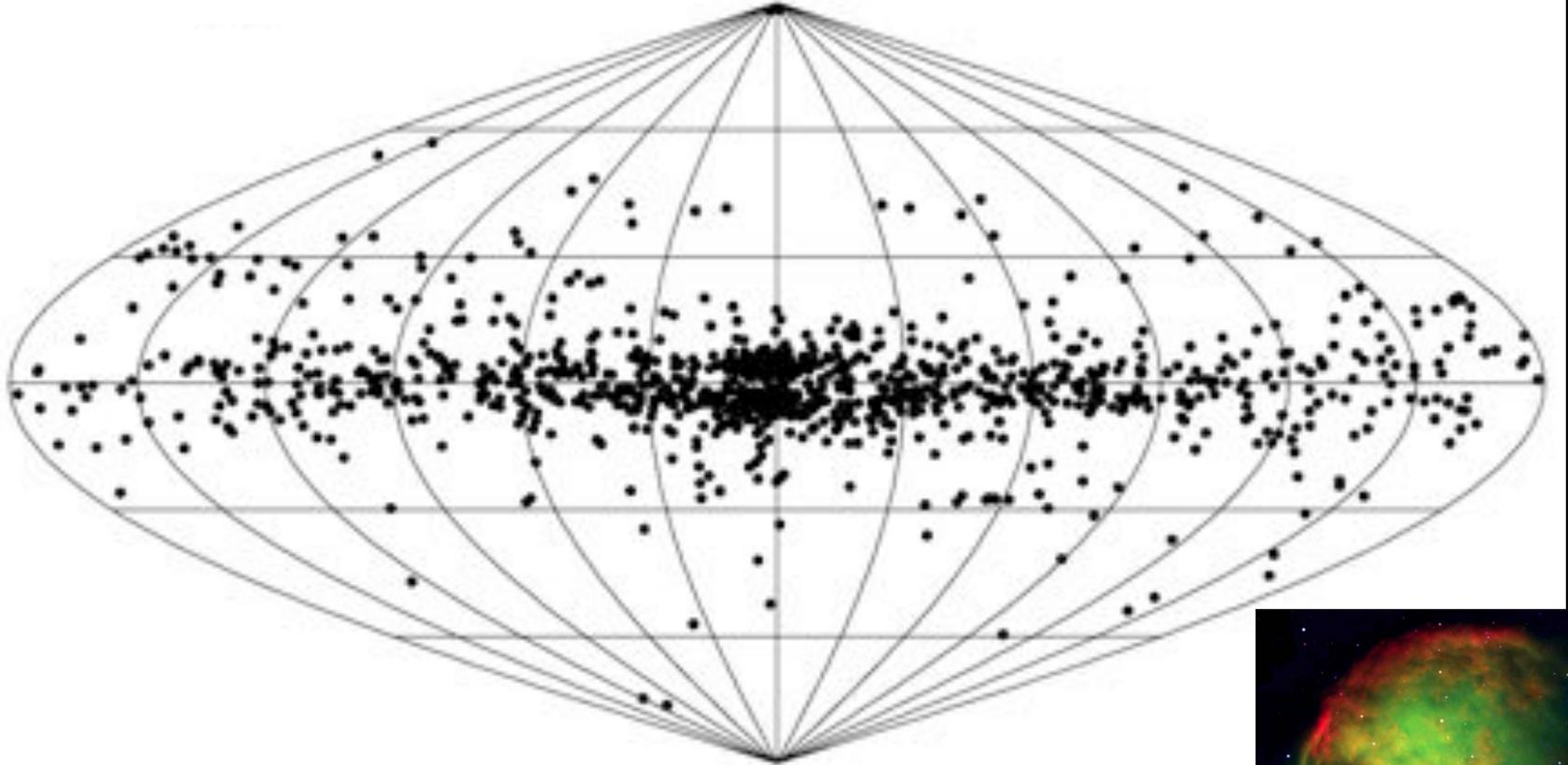
Galactique ou extra-galactique ?

Carte des étoiles proches : isotropie & mouvement apparent



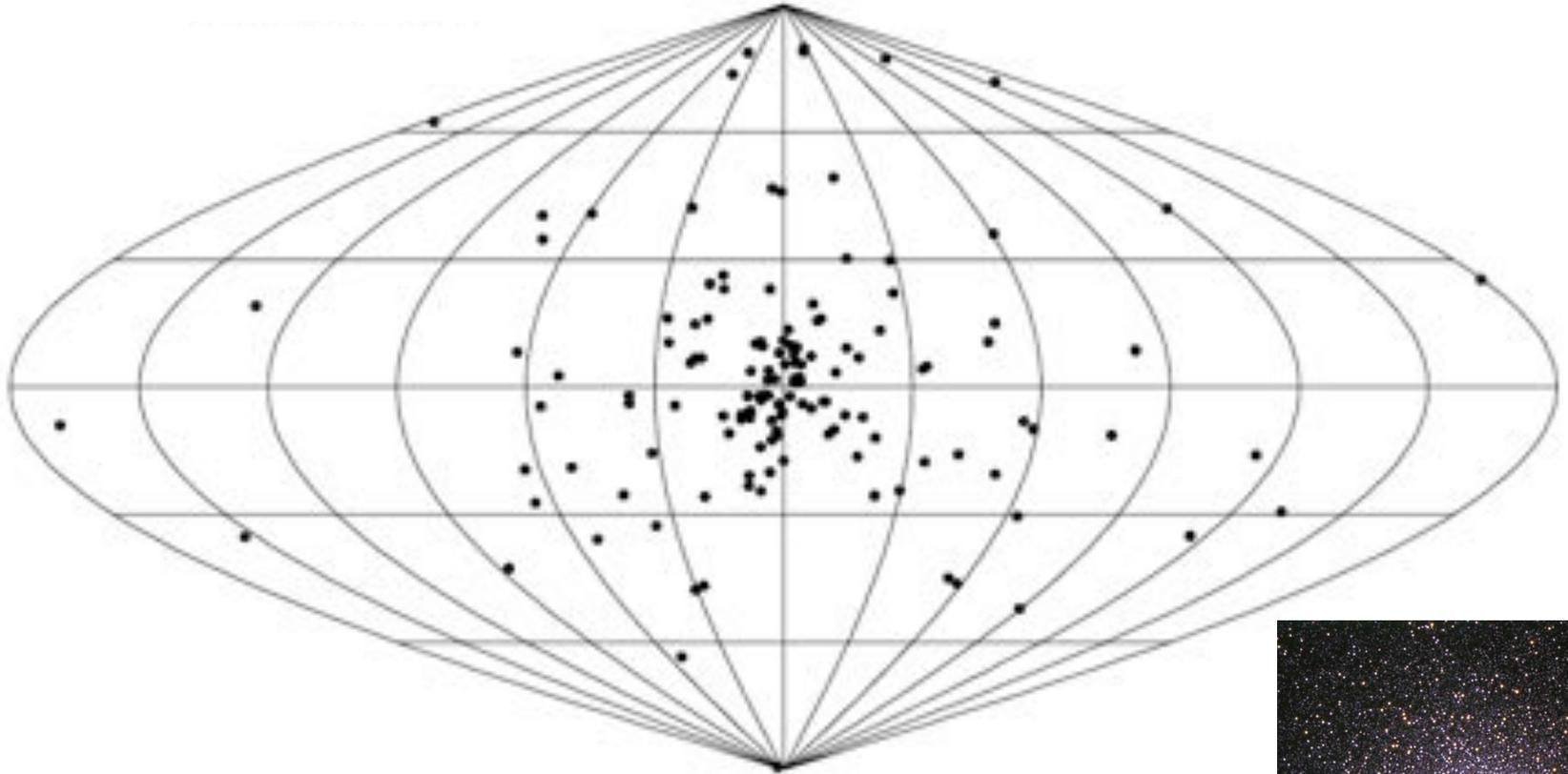
Galactique ou extra-galactique ?

Carte des nébuleuses planétaires : on voit le disque de la Galaxie



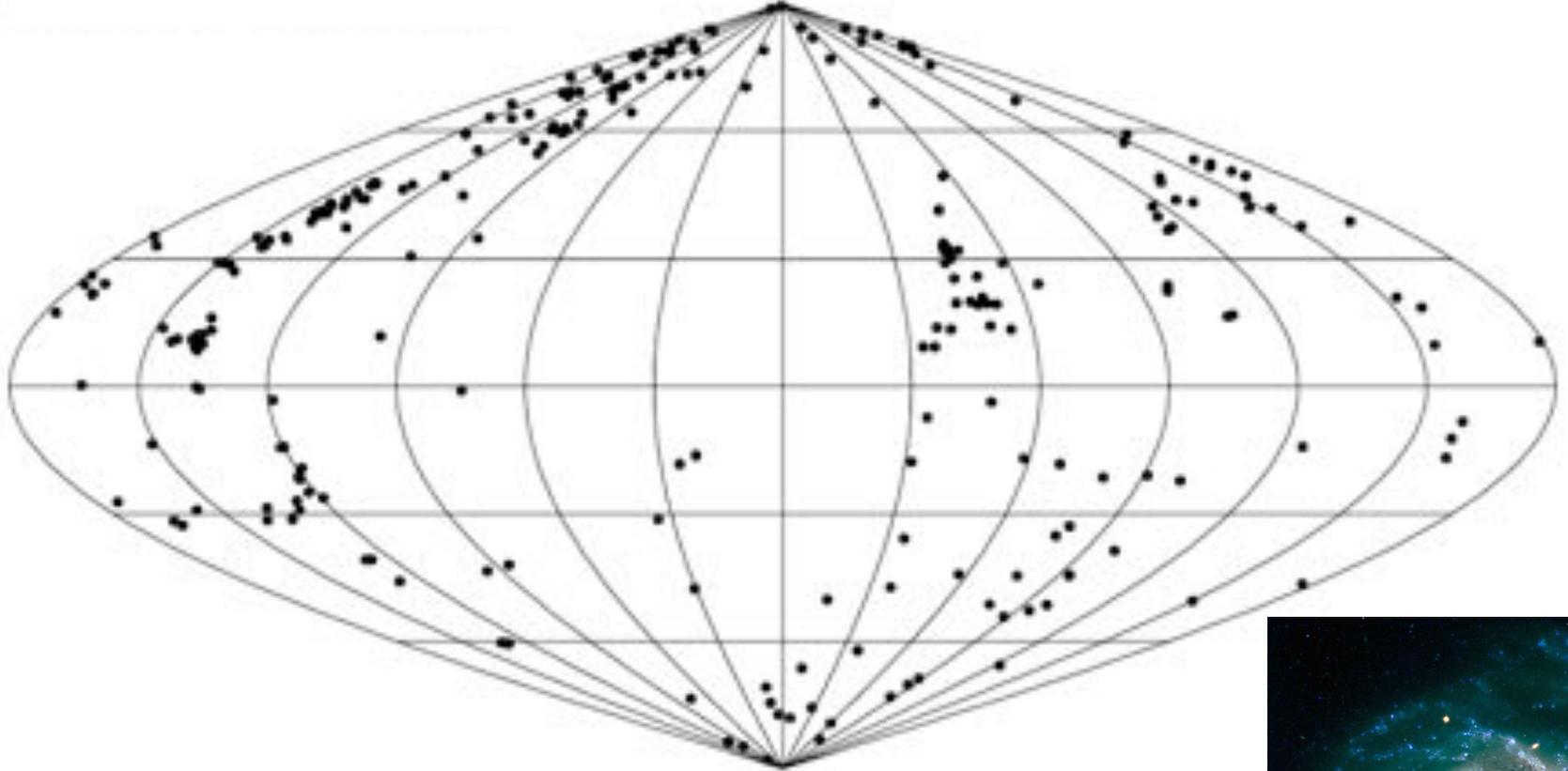
Galactique ou extra-galactique ?

Carte des amas globulaires : le Soleil n'est pas au centre de la Galaxie



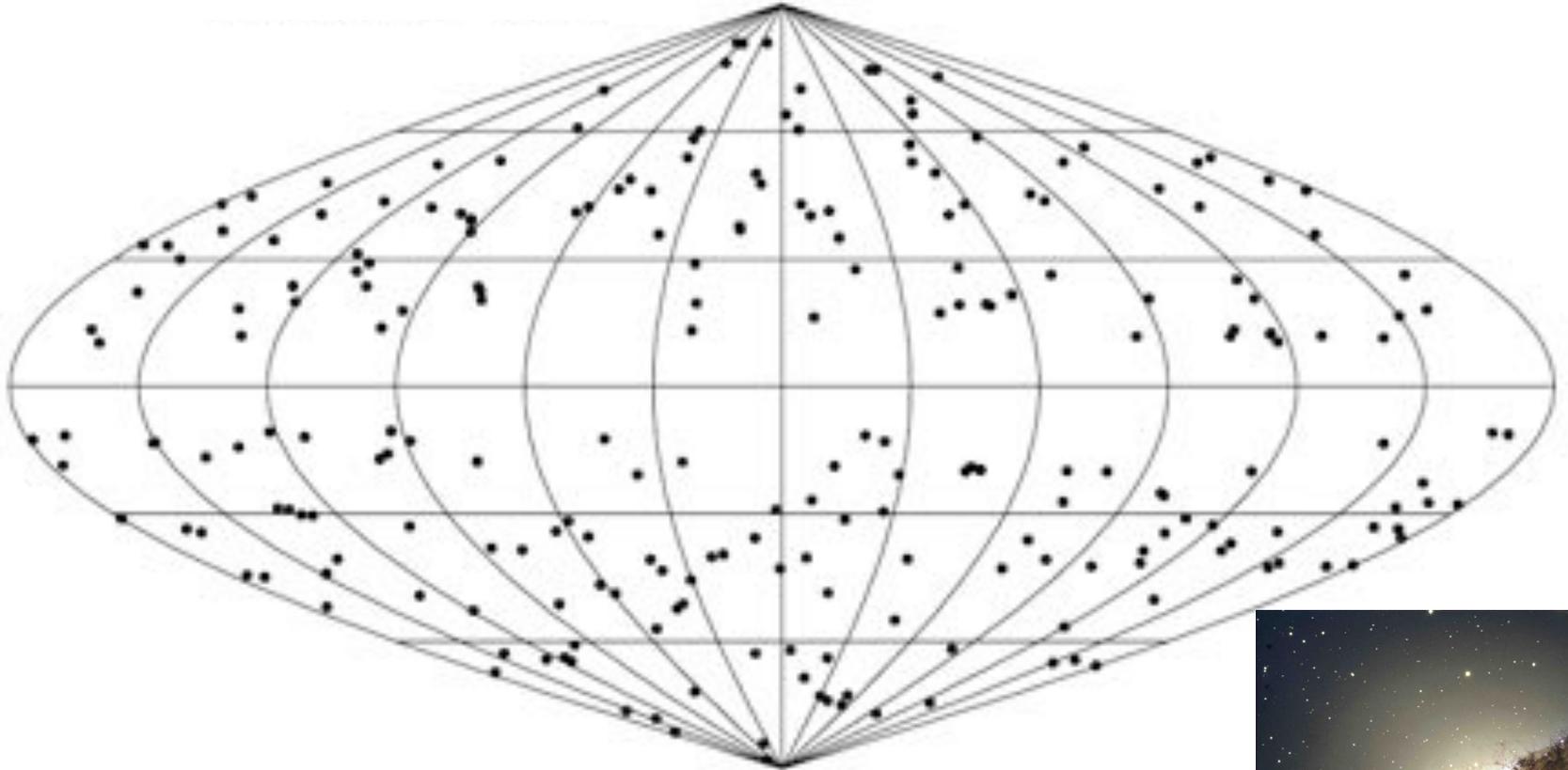
Galactique ou extra-galactique ?

Carte des galaxies proches : on voit des structures (groupes, amas).



Galactique ou extra-galactique ?

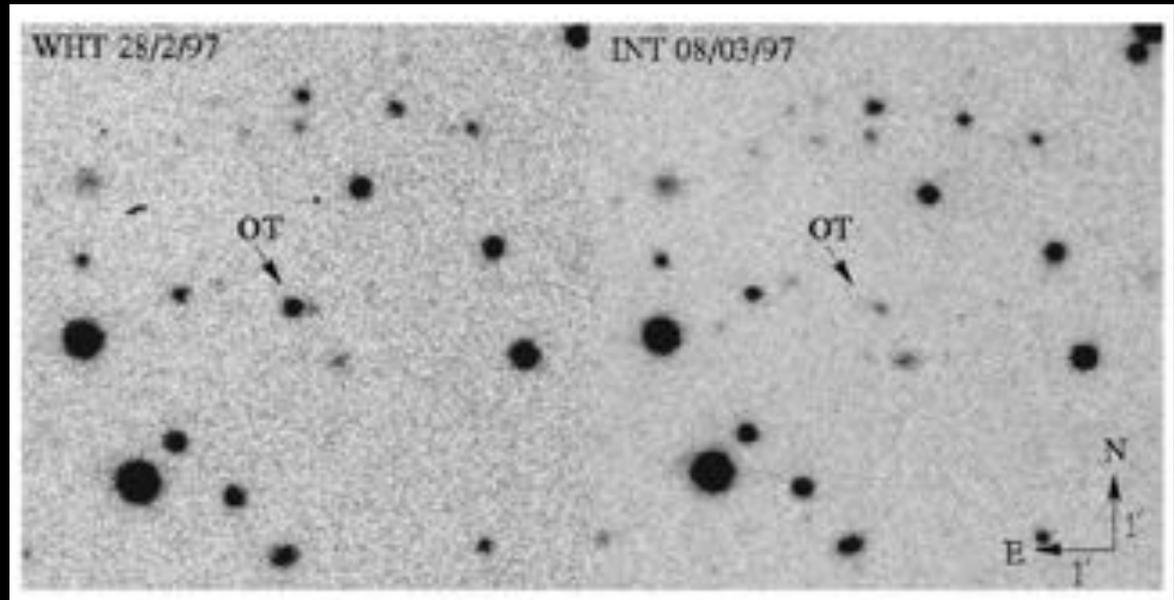
Carte des radio-galaxies (des galaxies à noyau actif, détectables à très grande distance) : distribution isotrope.



Les sursauts gamma

Les sursauts gamma sont des phénomènes très énergétiques, sans doute associés à la naissance d'un trou noir par l'effondrement gravitationnel d'une étoile très massive.

- En raison des grandes difficultés de la localisation en astronomie gamma, il a fallu 30 ans pour mesurer la distance des sursauts gamma : ils sont extragalactiques
- L'extrême variabilité (quelques ms) indique une source de très petite taille
- L'énergie libérée est plus importante que pour une supernova normale
- On pense donc que les sursauts sont associés à l'effondrement d'étoiles très massives
- On peut montrer que de la matière est éjectée à des vitesses très proches de celle de la lumière



van Paradijs et al. 1997

Les sursauts gamma

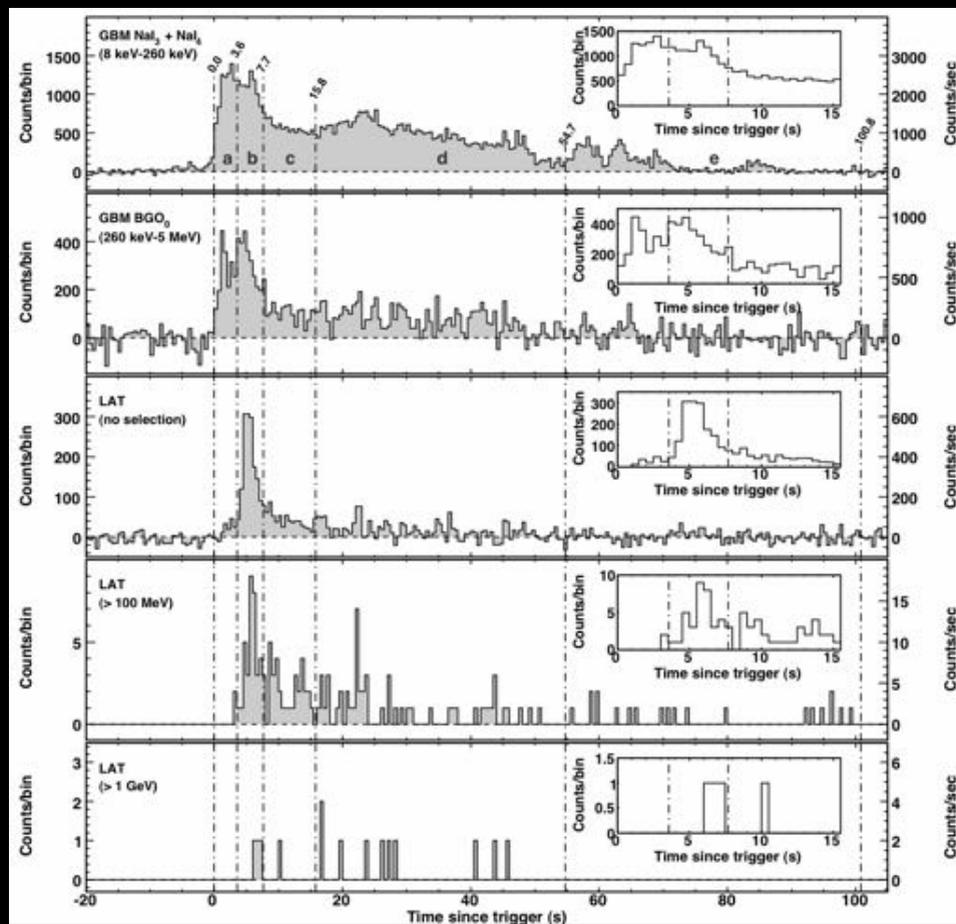
Les sursauts gamma sont des phénomènes très énergétiques, sans doute associés à la naissance d'un trou noir par l'effondrement gravitationnel d'une étoile très massive.

- Les sursauts gamma sont un bon exemple de laboratoires naturels pour tester la physique dans les conditions les plus extrêmes.
- Exemple :

Le satellite Fermi permet d'observer les sursauts gamma avec des photons d'énergies très différentes : est-ce qu'ils arrivent tous en même temps ?

Les différences ne dépassent pas quelques secondes ou dizaines de secondes, pour une distance qui se compte en milliards d'années lumière !

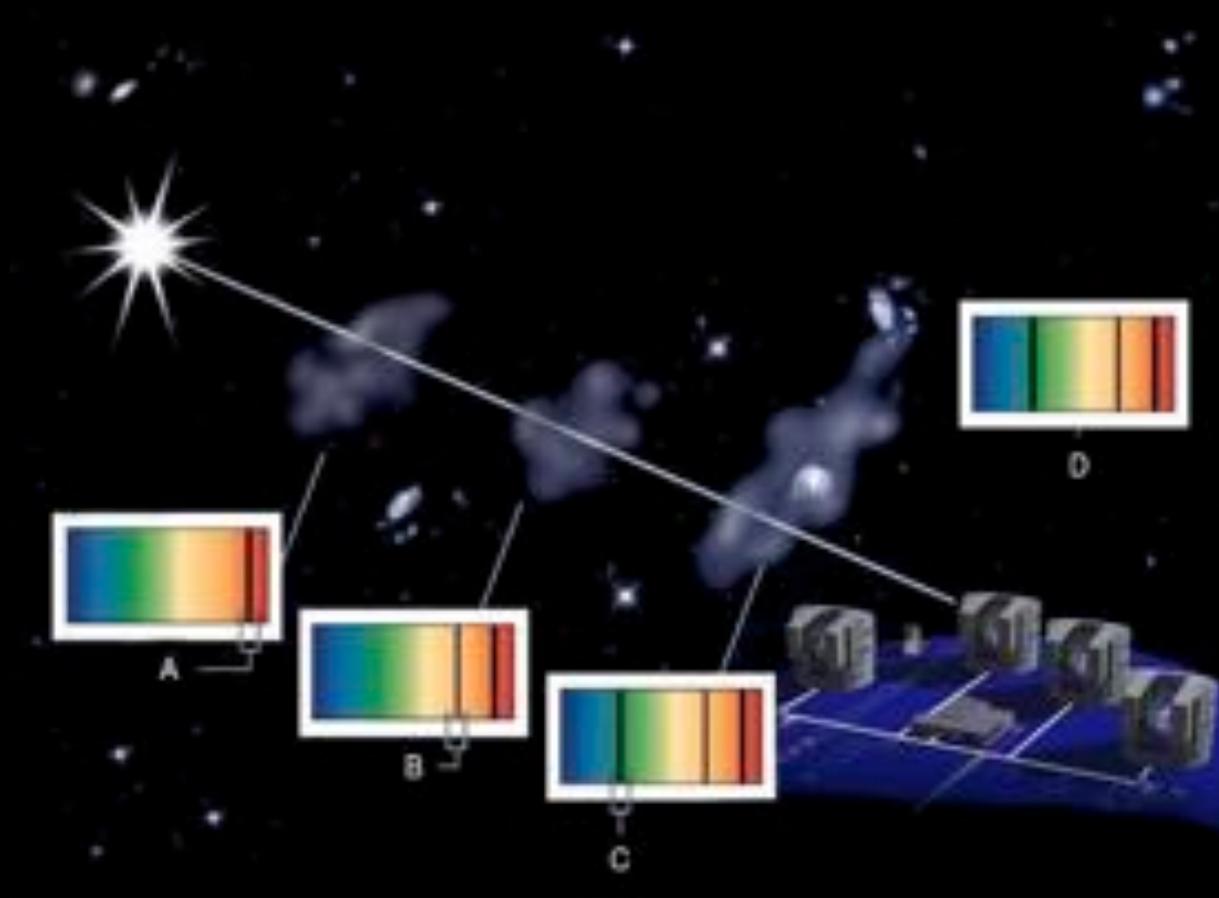
Cela pose des limites très strictes sur de possibles variations de la vitesse de la lumière avec l'énergie des photons.



Les sursauts gamma

Les sursauts gamma sont des phénomènes très énergétiques, sans doute associés à la naissance d'un trou noir par l'effondrement gravitationnel d'une étoile très massive.

- Les sursauts gamma sont un des traceurs considérés comme les plus prometteurs pour sonder l'époque de la première génération d'étoiles et de la réionisation.



Histoire de l'Univers

L'histoire de l'Univers est celle d'un refroidissement, qui s'accompagne de transitions et de découplages successifs.

En remontant vers le passé :

- âge ~ 10 milliards d'années – Début de l'ère de l'énergie noire
- âge ~ 150 millions à 1 milliard d'années ? – Formation des premières étoiles et réionisation
- âge ~ 380 000 ans ($T \sim 3\,500\text{ K}$) – Découplage des photons (émission rayonnement fossile)
- âge ~ 70 000 ans ($T \sim 10\,000\text{ K}$) – Début de l'ère de la matière (début formation structures)
- âge ~ 3 → 20 minutes ($T \sim 1\text{ milliard} \rightarrow 300\text{ millions de degrés}$) - Nucléosynthèse primordiale
- âge ~ 1 s ($T \sim 10\,000\text{ milliards de degrés}$) – Formation des nucléons, découplage des neutrinos (émission d'un rayonnement fossile de neutrinos)
- âge ~ 1 micro-seconde ($T \sim 1\text{ million de milliards de degrés}$) – Les 4 interactions fondamentales sont telles que nous les connaissons aujourd'hui.

Ensuite, plus on remonte dans le passé, plus la physique est incertaine.

Avant 10^{-36} s , on pense que toutes les interactions fondamentales se confondent en une seule (*la grande unification*).

Avant 10^{-43} s (ère de Planck), la physique est inconnue. Les notions de temps et d'espace sont mal définies... Impossible de savoir pour l'instant s'il y a vraiment une singularité en $t = 0$. Est-ce qu'il y a un Big Bang ?

Beaucoup de questions

La cosmologie moderne décrit un Univers en évolution. En se fondant sur les lois physiques que nous connaissons, il est possible de décrire précisément cette évolution, avec des résultats en très grande cohérence avec un grand nombre d'observations extrêmement variées. Malgré ce succès de la théorie du *Big Bang*, des questions très importantes restent ouvertes :

Certaines sont reliées à l'Univers aux confins de l'Univers actuellement déjà observable par nos moyens instrumentaux :

- Quels sont les détails de la formation des structures, des galaxies, ... Quand apparaissent les premières étoiles ? Quand se termine la réionisation ? ...

Des réponses semblent accessibles à court terme, grâce à des efforts instrumentaux importants pour explorer les âges sombres, l'époque de réionisation, la première génération d'étoiles (➡ cours n°12).

Beaucoup de questions

La cosmologie moderne décrit un Univers en évolution. En se fondant sur les lois physiques que nous connaissons, il est possible de décrire précisément cette évolution, avec des résultats en très grande cohérence avec un grand nombre d'observations extrêmement variées. Malgré ce succès de la théorie du *Big Bang*, des questions très importantes restent ouvertes :

D'autres sont beaucoup plus fondamentales, souvent liées aux conditions physiques dans l'Univers très primordial.

- Nature de la matière noire
- Nature de l'énergie noire
- Topologie de l'Univers
- Pourquoi le rayonnement fossile est-il aussi isotrope ? (problème de l'horizon)
- Pourquoi l'Univers est-il aussi parfaitement plat ? (problème de la platitude)
- Pourquoi les signatures attendues de la grande unification dans l'époque très primordiale ne sont pas observées ? (problème des reliques)
- Pourquoi l'Univers dispose de plus de matière que d'antimatière ?

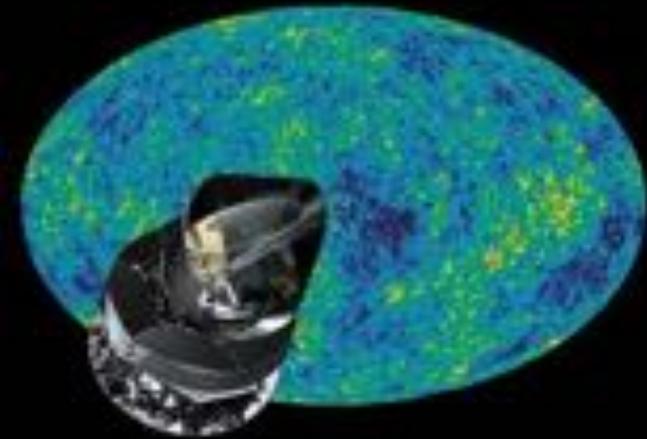
Une piste théorique intéressante pour résoudre plusieurs de ces problèmes : une phase initiale d'inflation vers $t \sim 10^{-34}$ s.

Beaucoup de questions

La cosmologie moderne décrit un Univers en évolution. En se fondant sur les lois physiques que nous connaissons, il est possible de décrire précisément cette évolution, avec des résultats en très grande cohérence avec un grand nombre d'observations extrêmement variées. Malgré ce succès de la théorie du *Big Bang*, des questions très importantes restent ouvertes :

Quels progrès observationnels sont envisageables à court terme ?

- Trouver des signatures indirectes de l'époque très primordiale. Par exemple dans les anisotropies du rayonnement fossile (satellite ESA Planck)
- Caractériser finement les propriétés de la matière noire et de l'énergie noire.

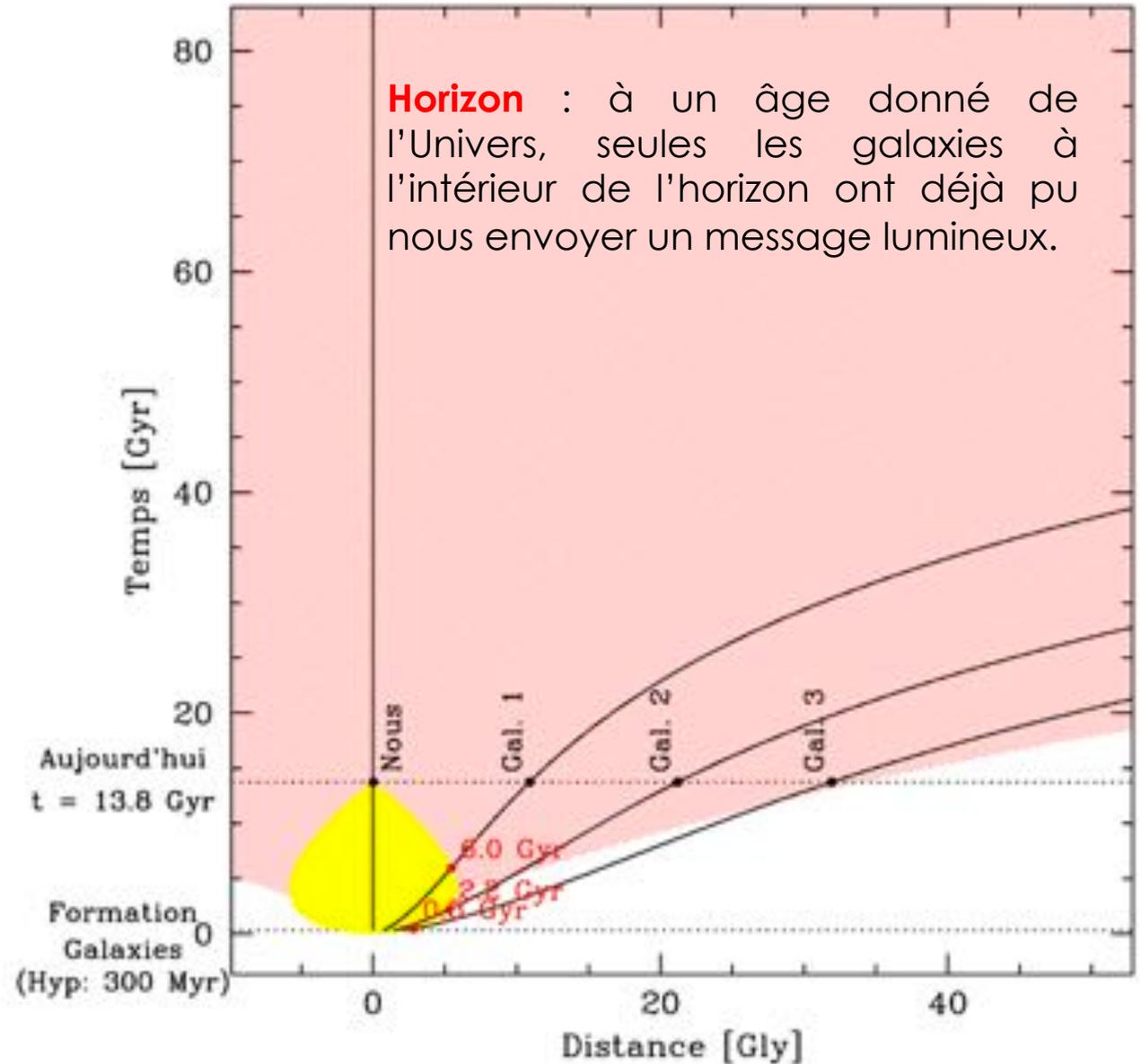


A plus long terme, on peut aussi espérer :

- Détecter le rayonnement fossile de neutrinos (émis vers $t \sim 1$ s)
- Détecter le rayonnement fossile d'ondes gravitationnelles (émis à l'époque de l'inflation ?)

L'Univers dans le futur

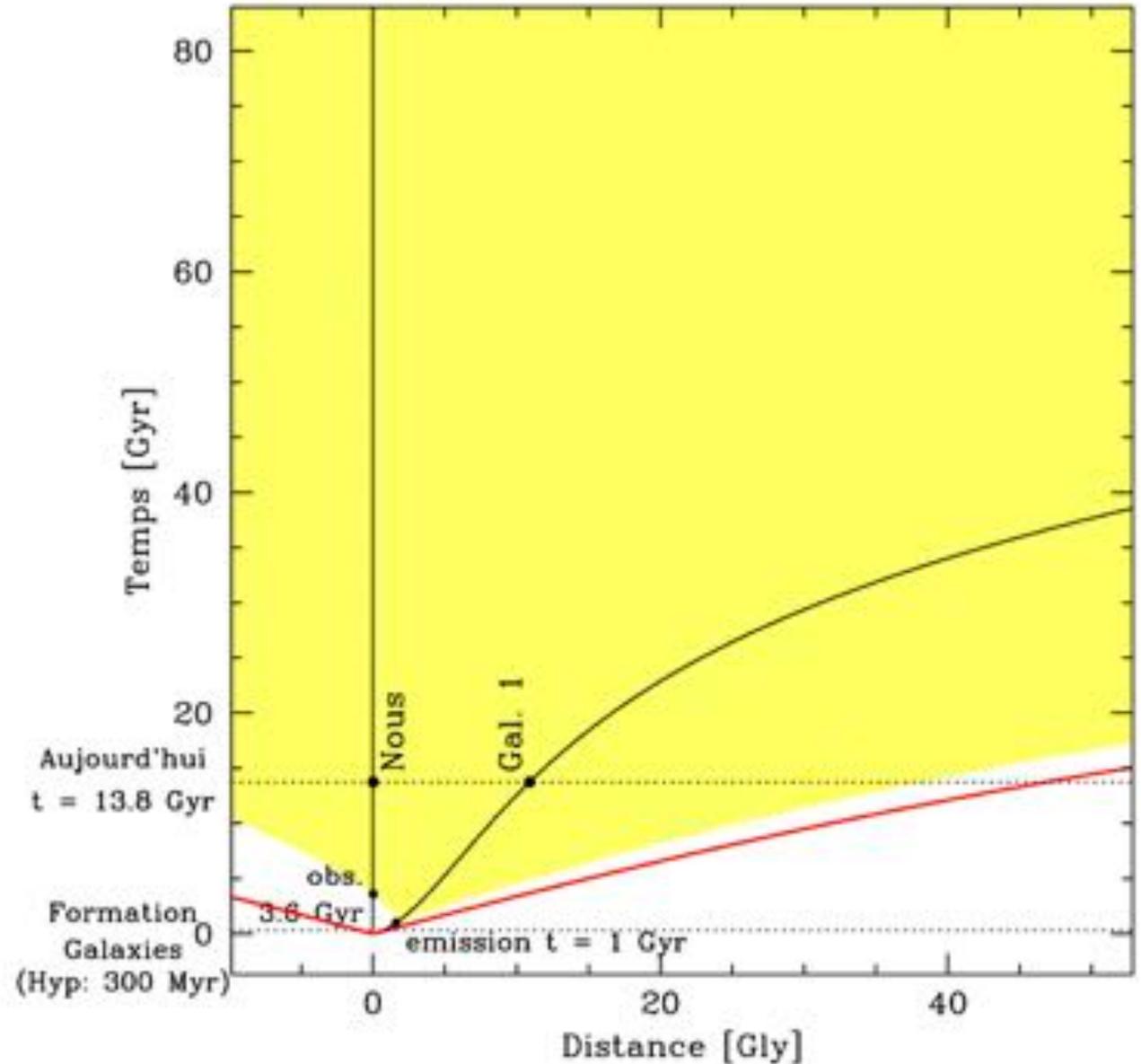
L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

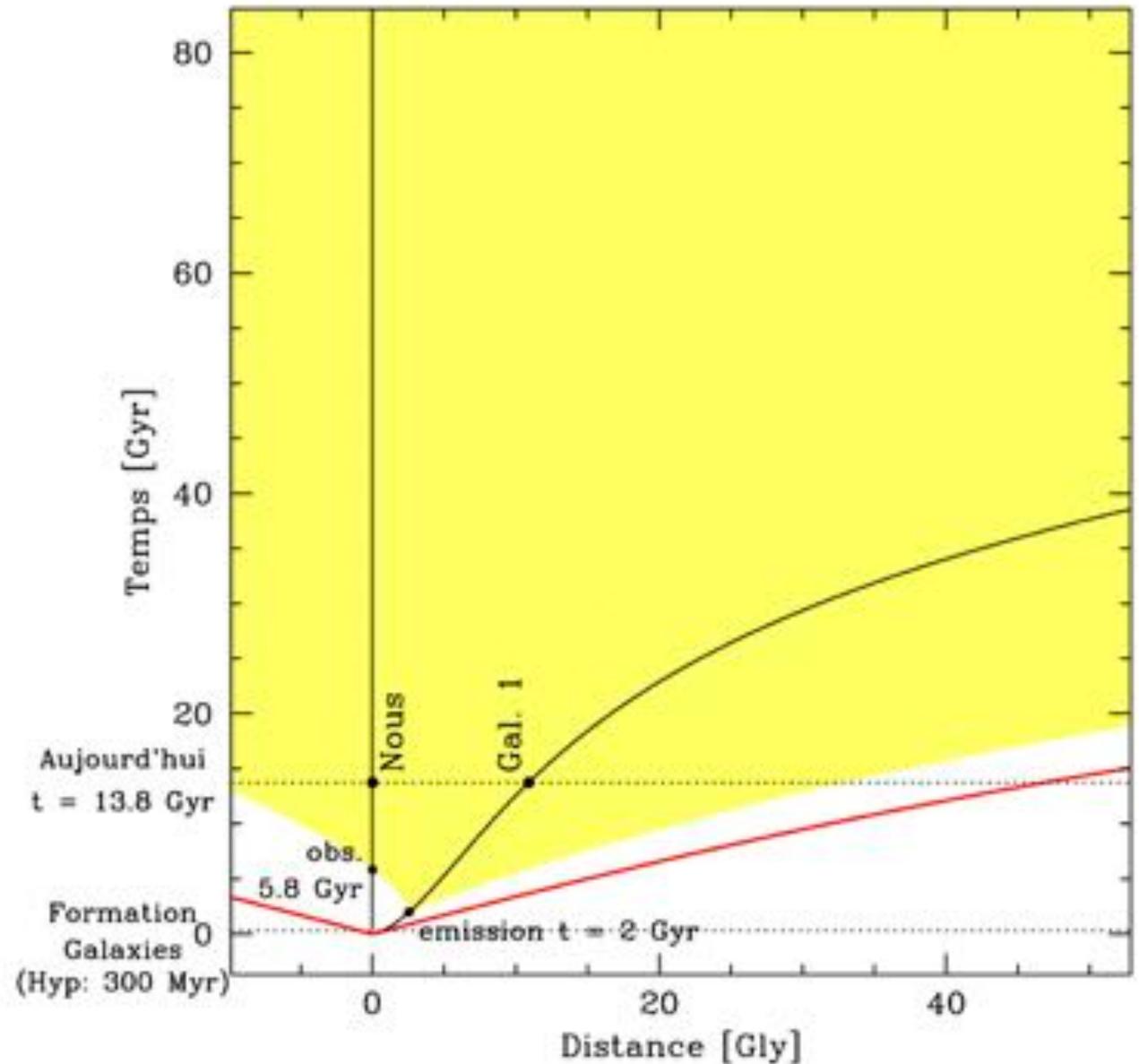
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

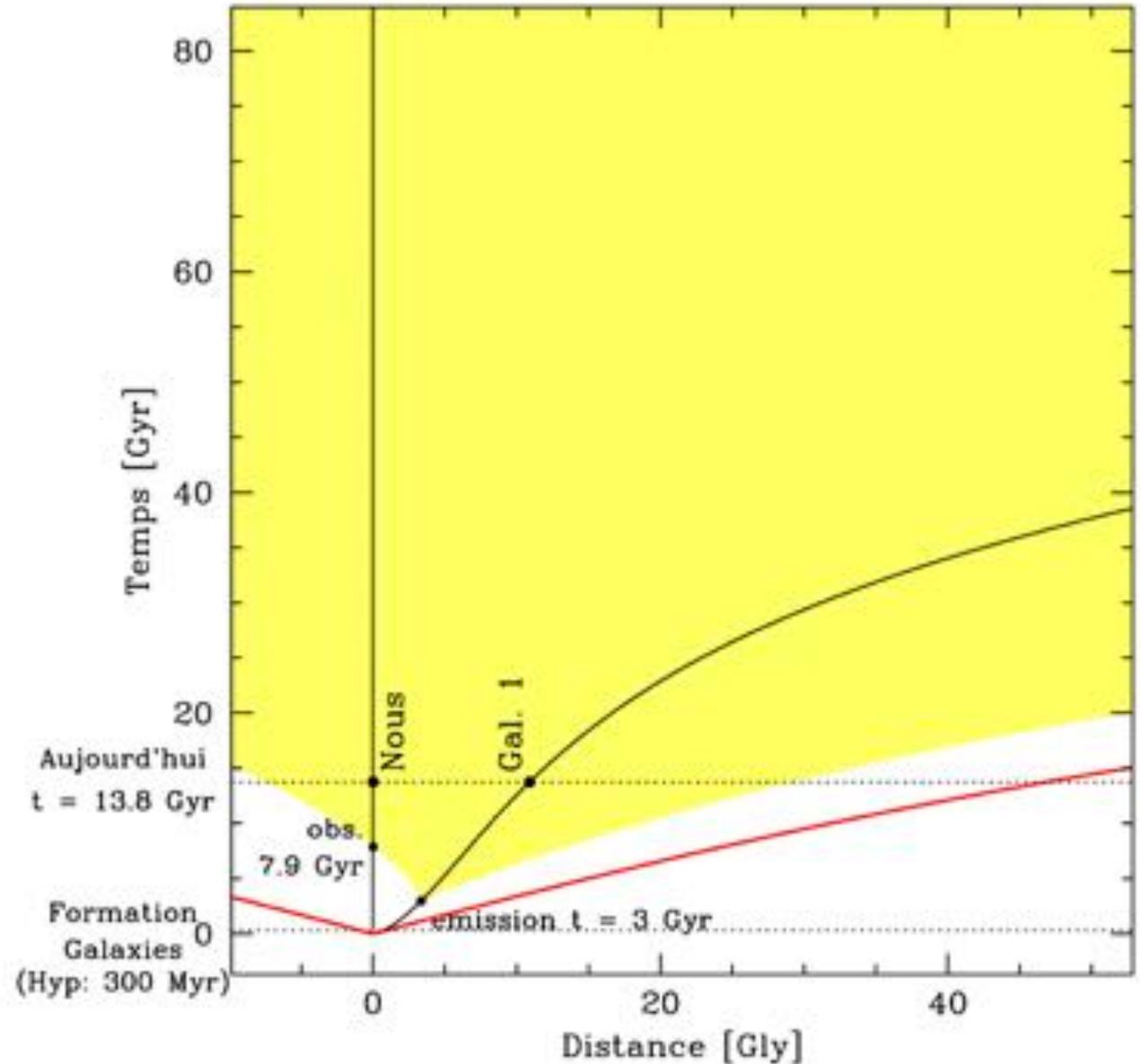
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

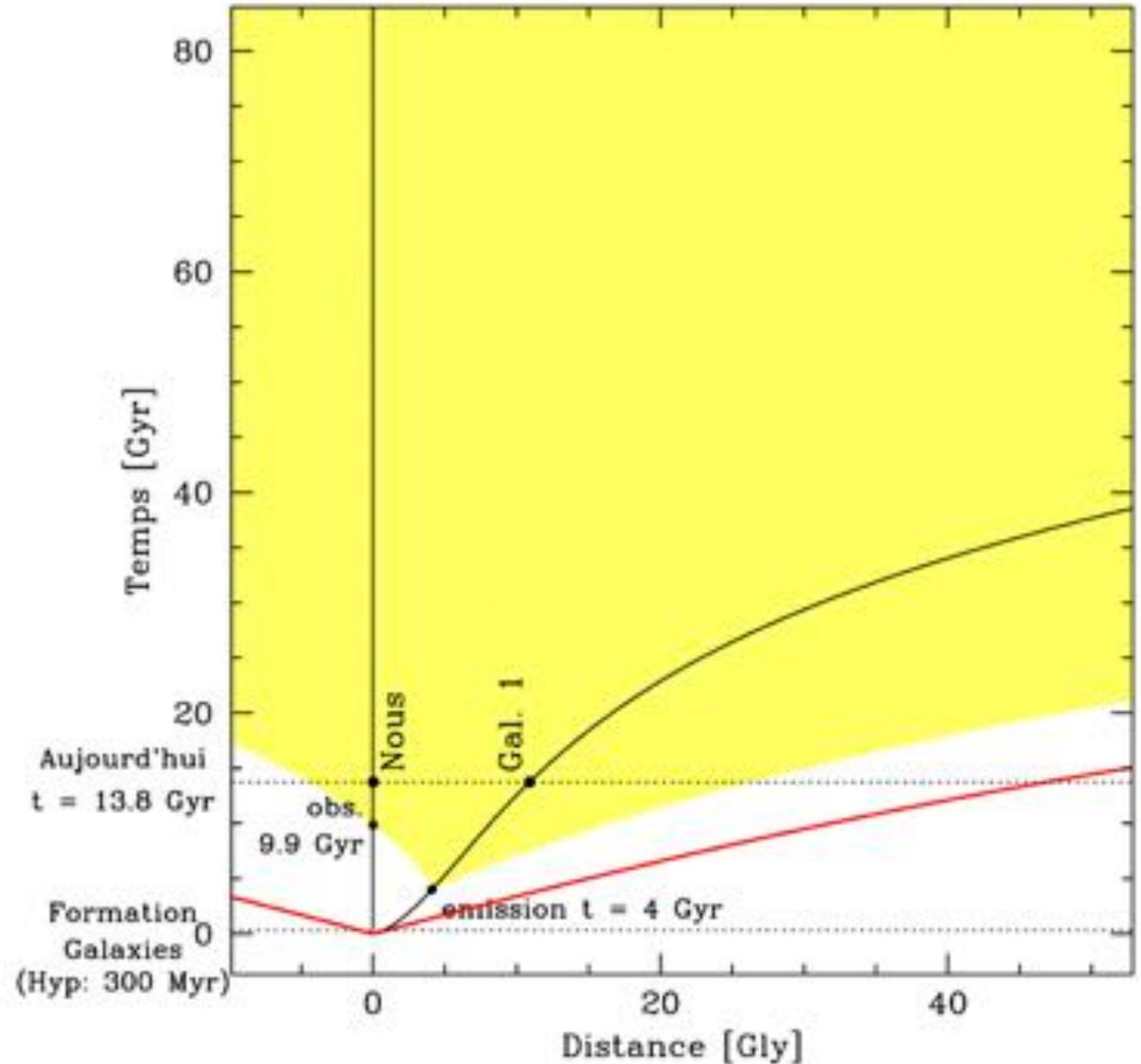
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

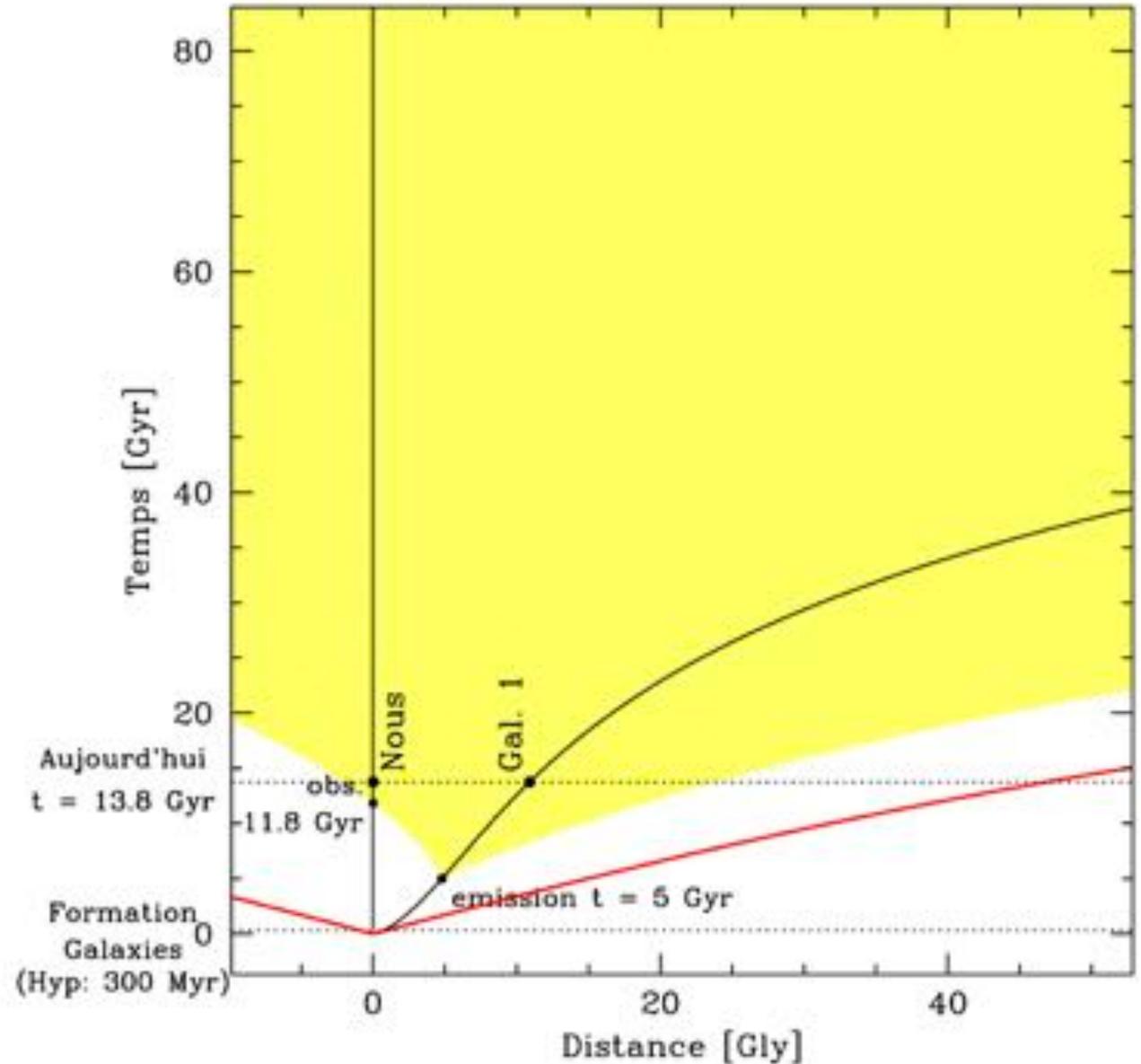
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

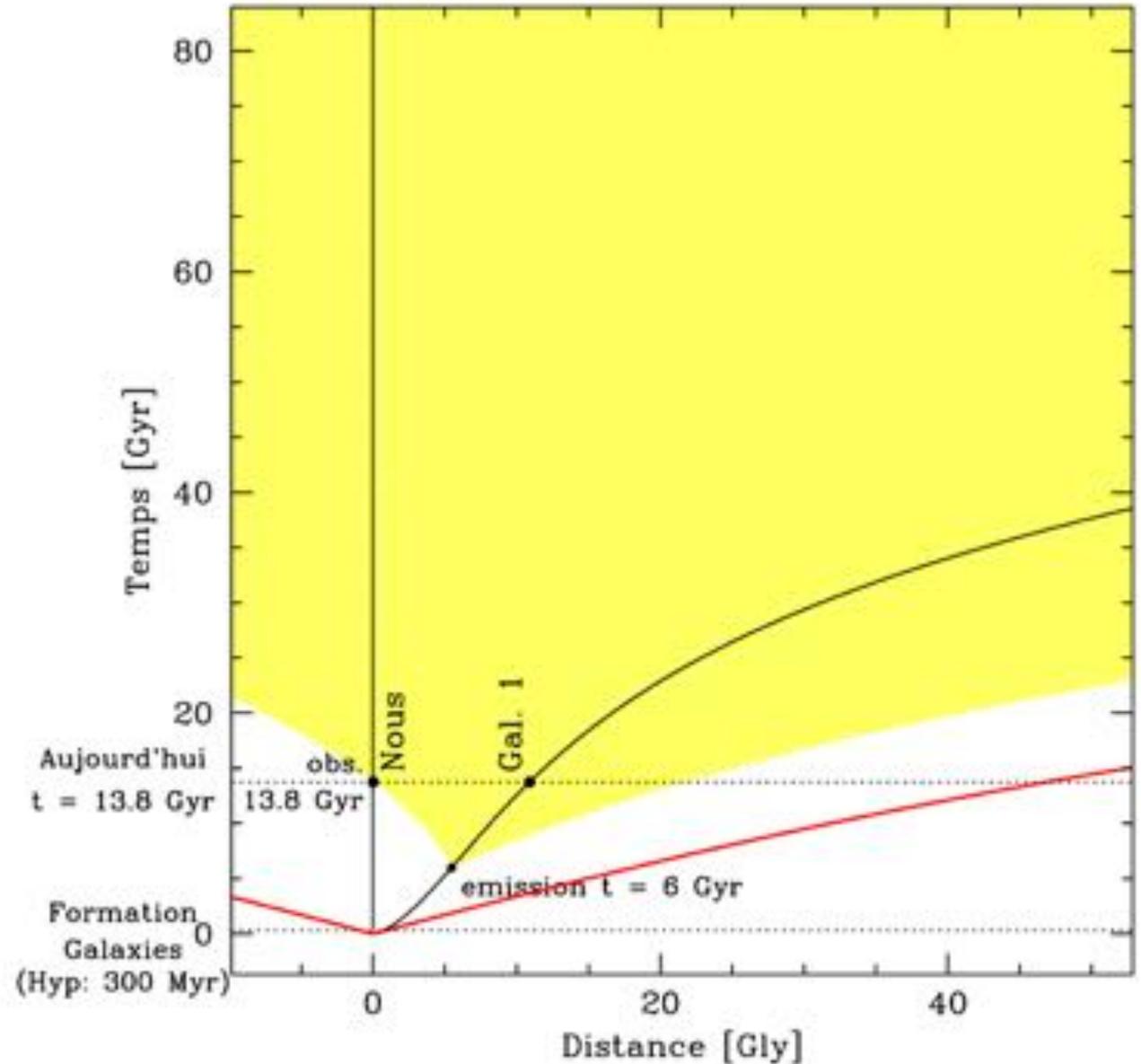
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

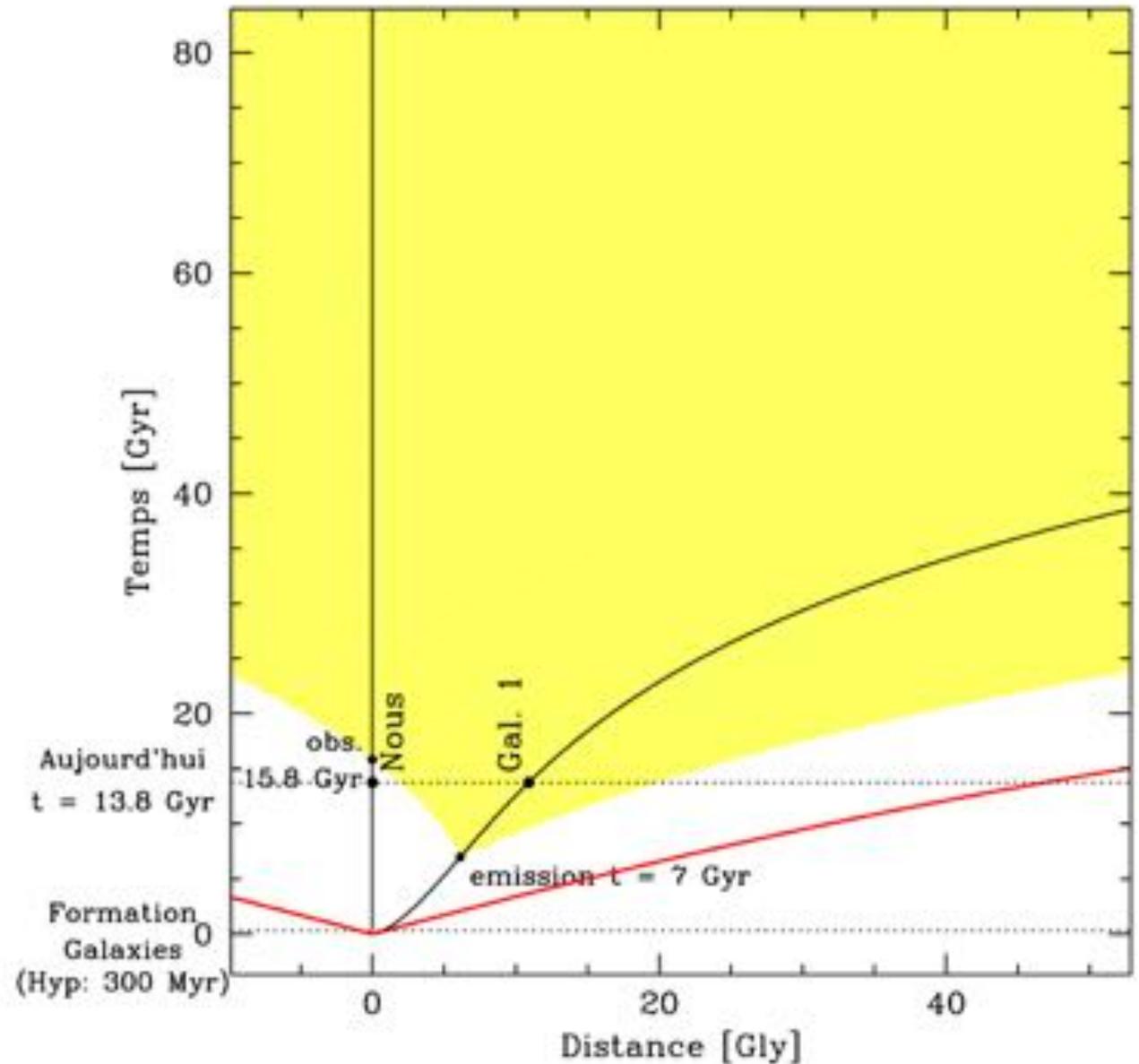
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

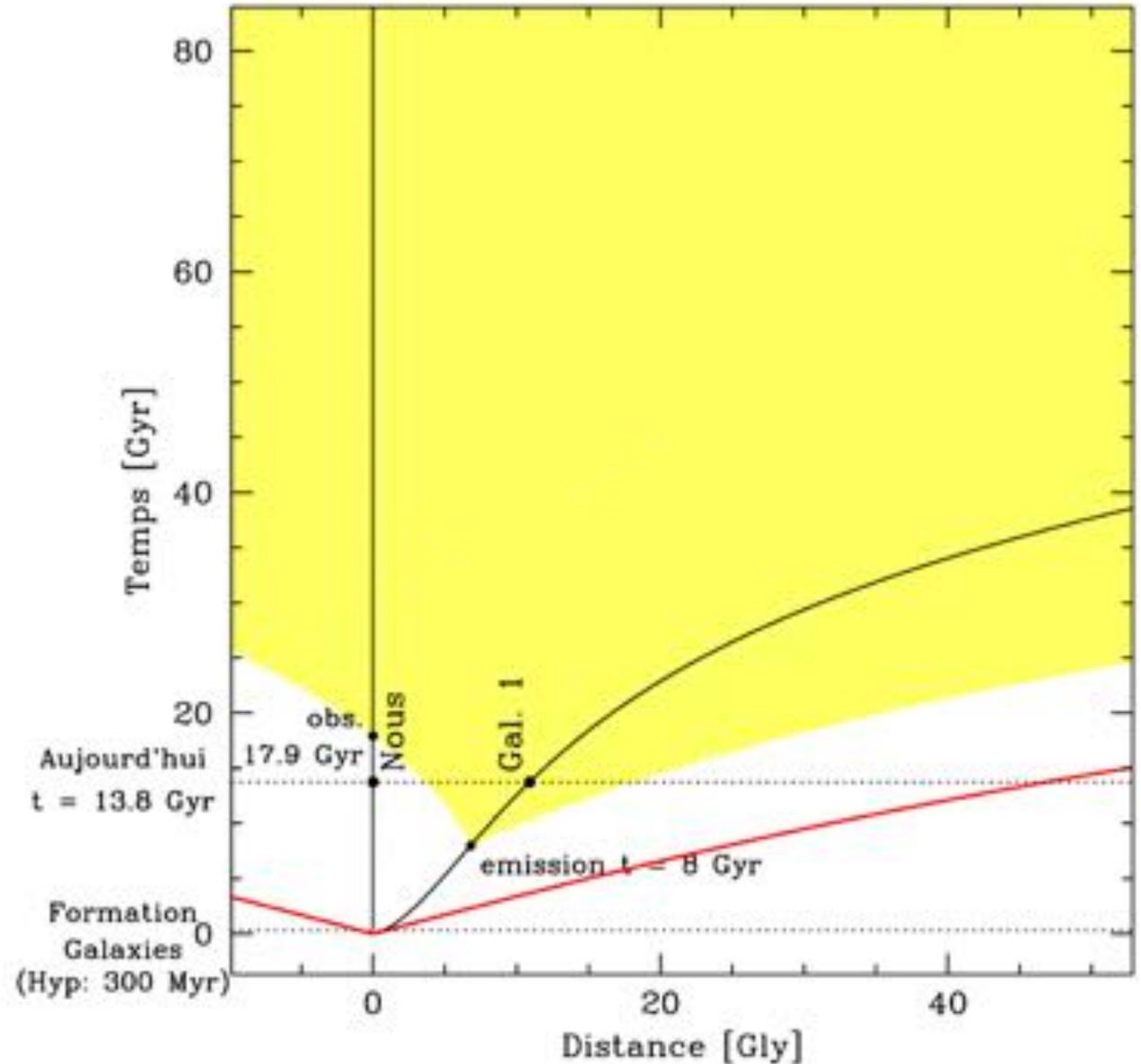
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

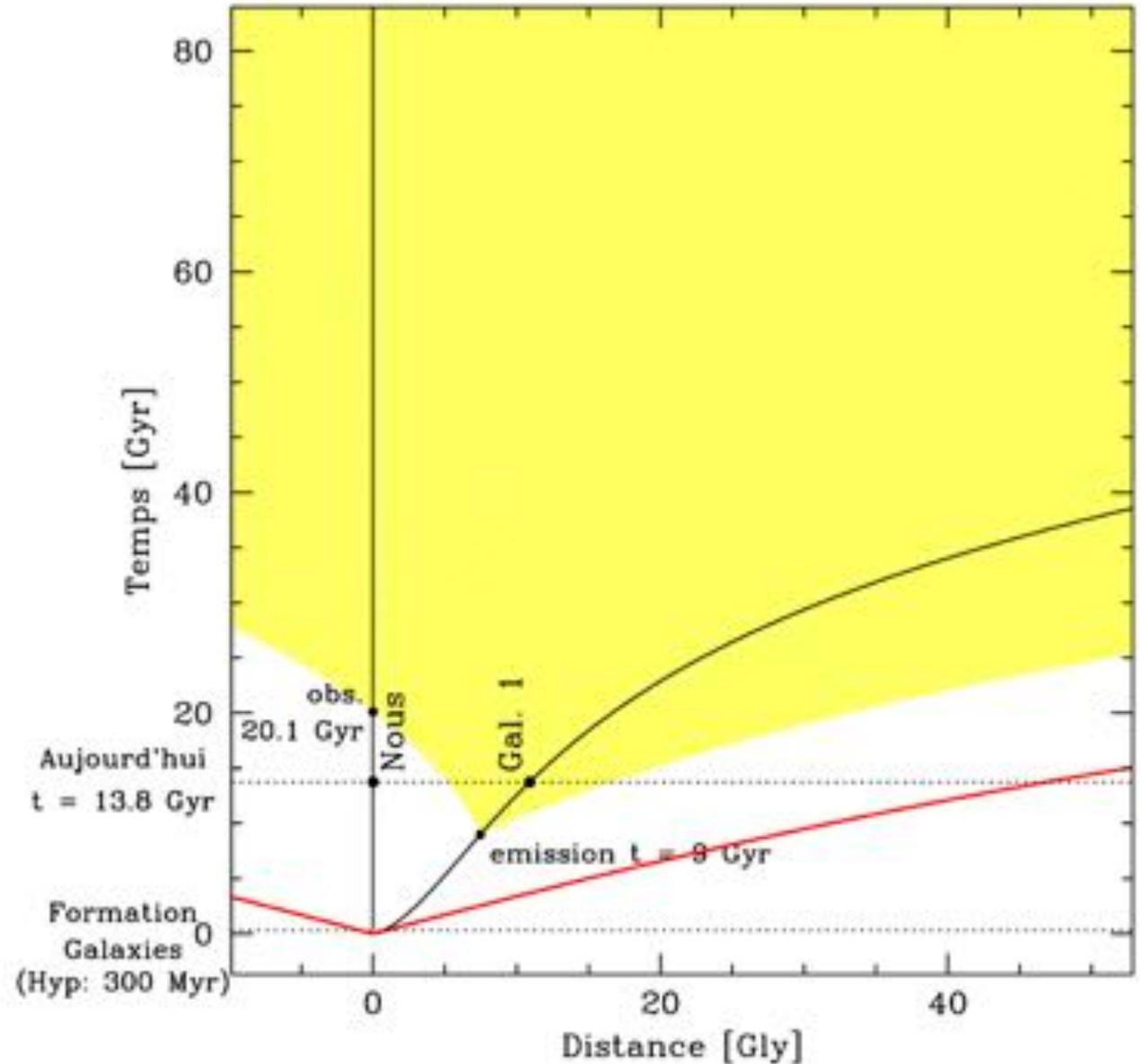
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

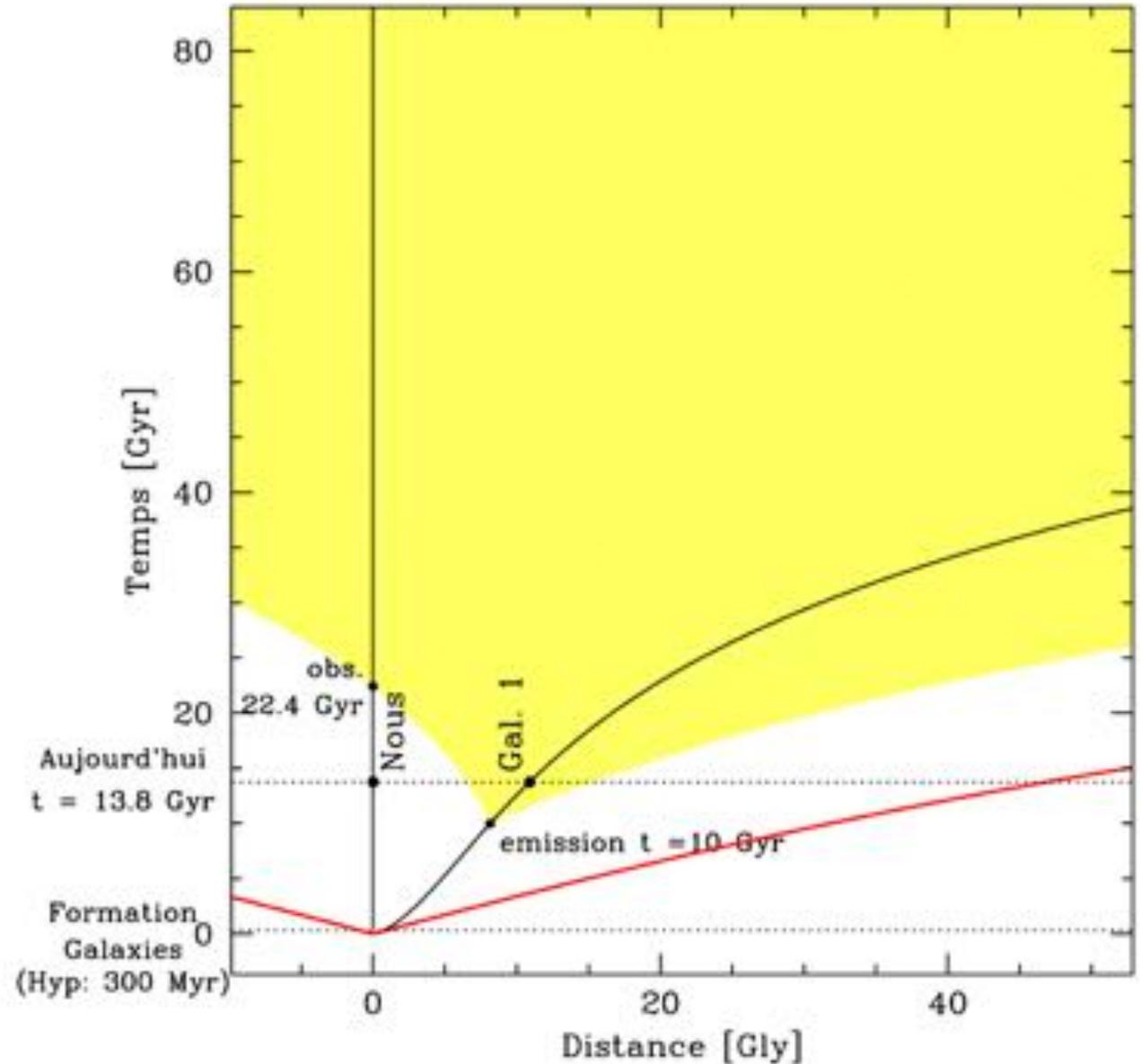
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

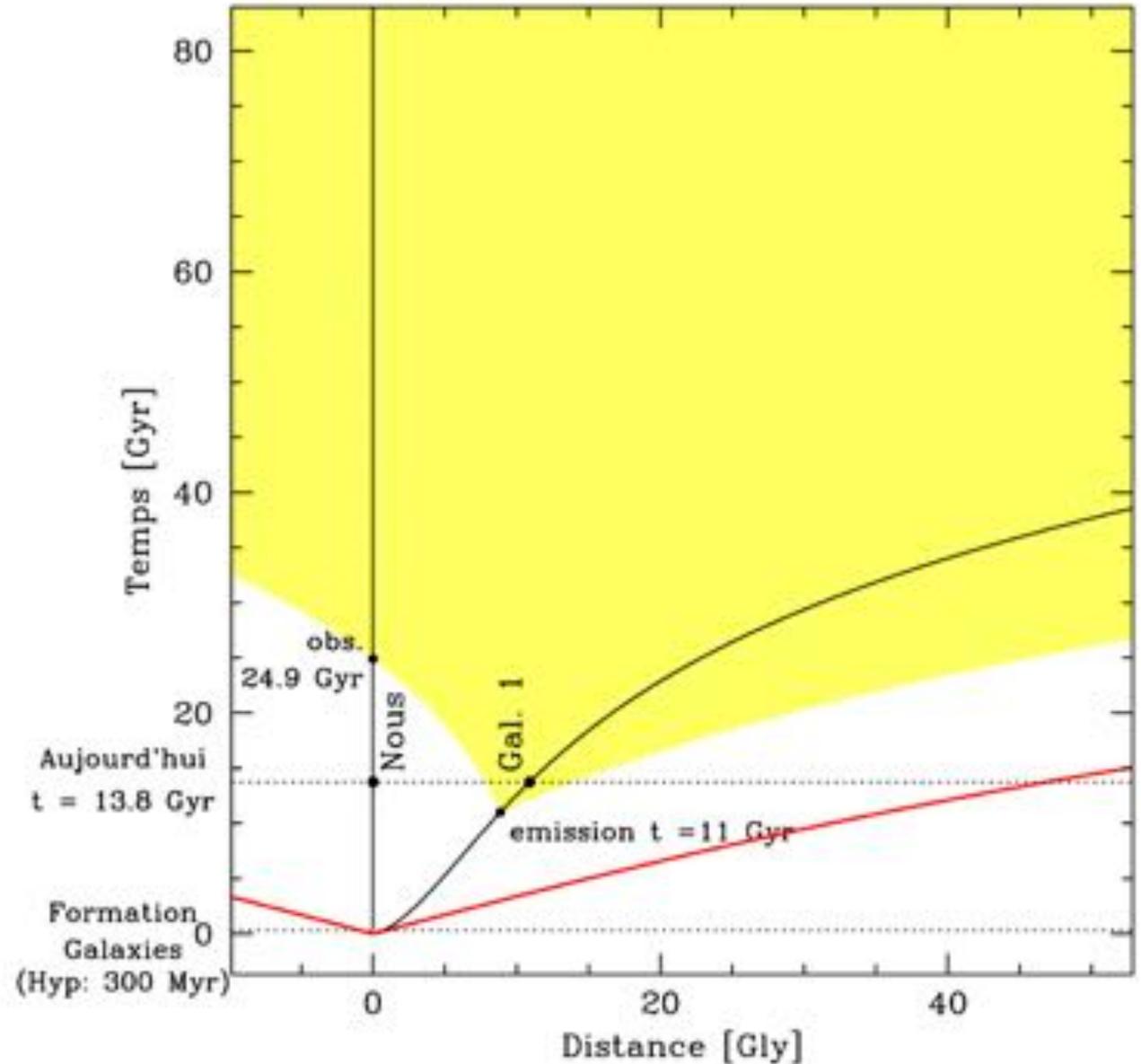
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

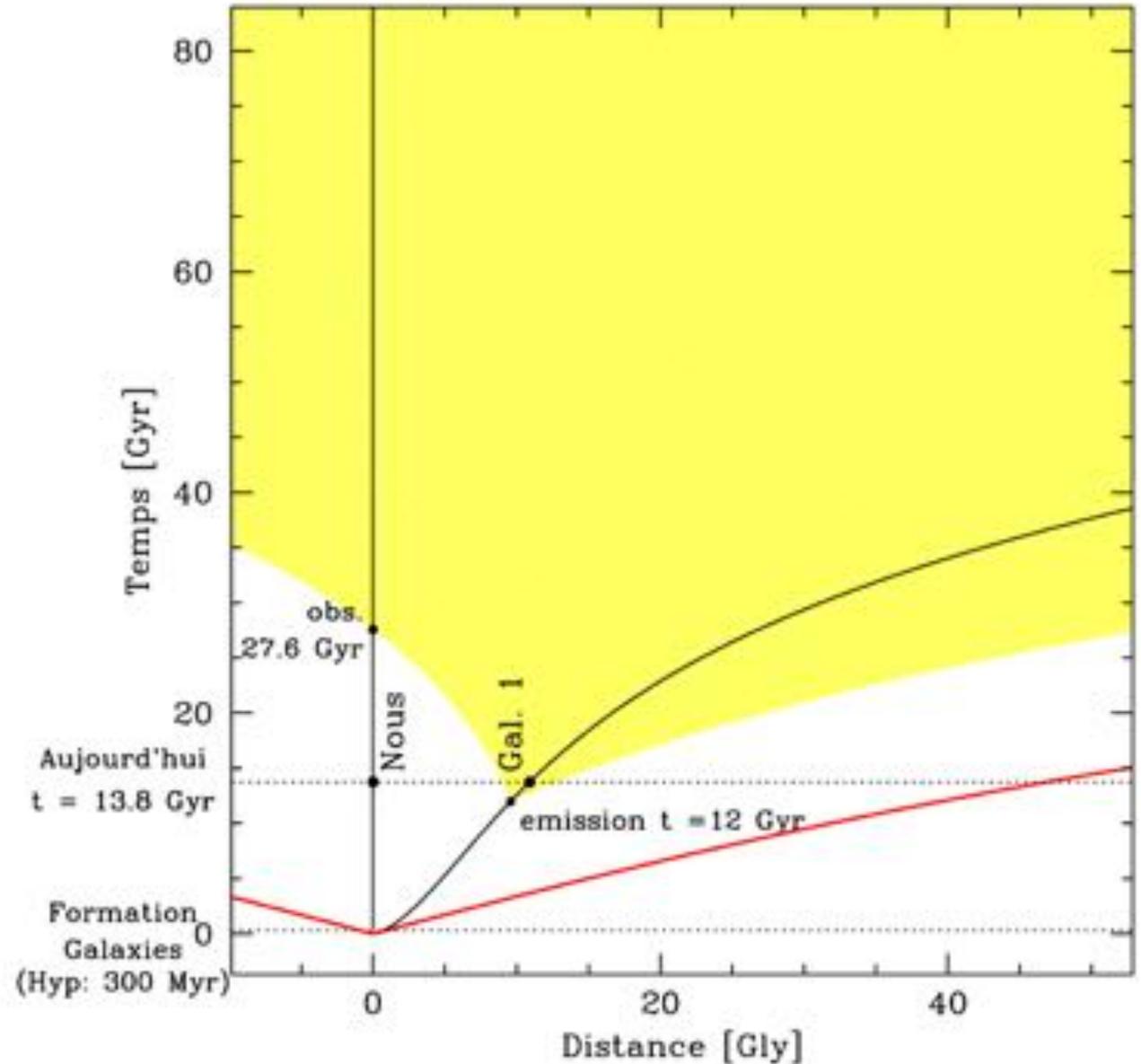
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

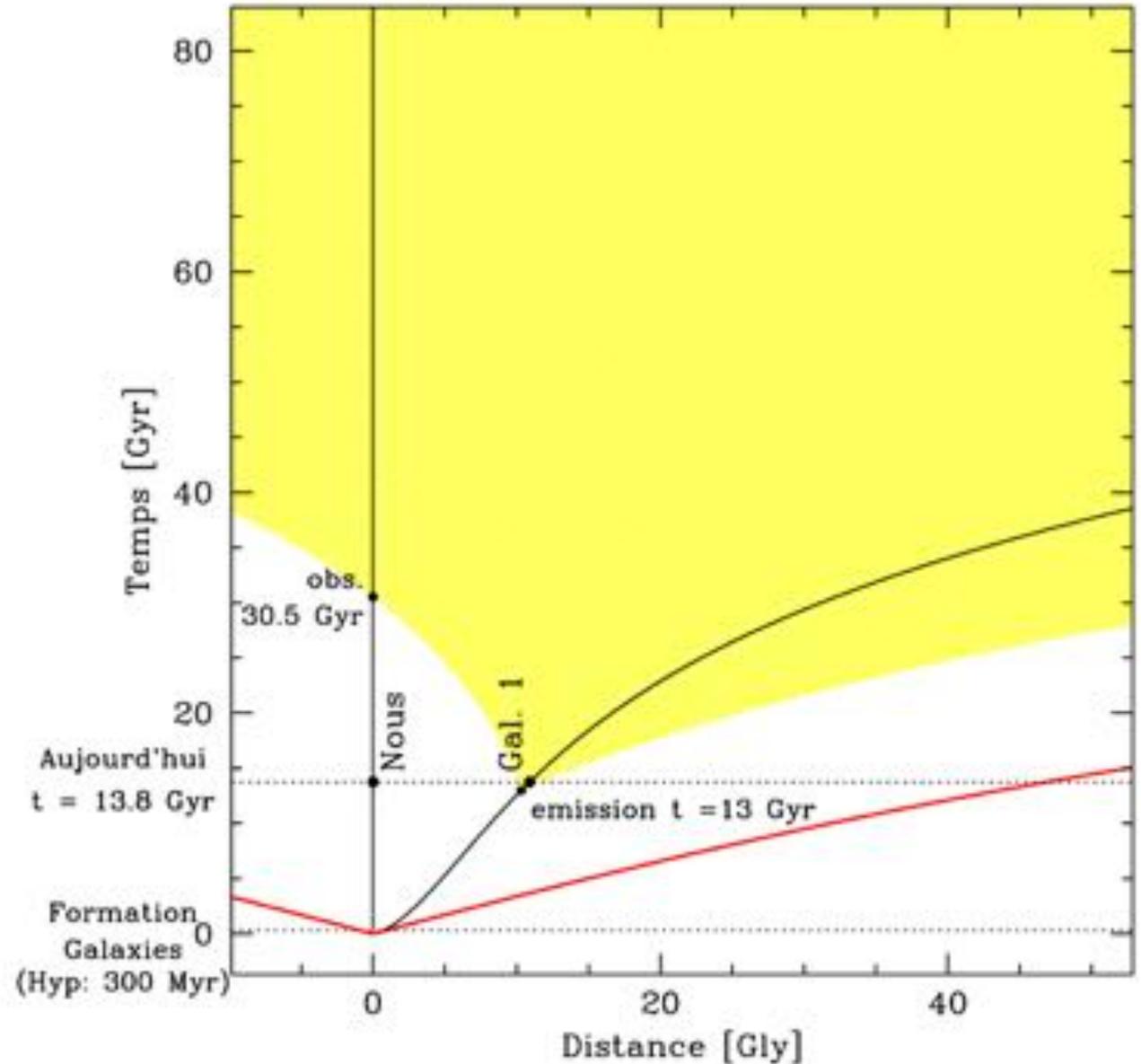
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

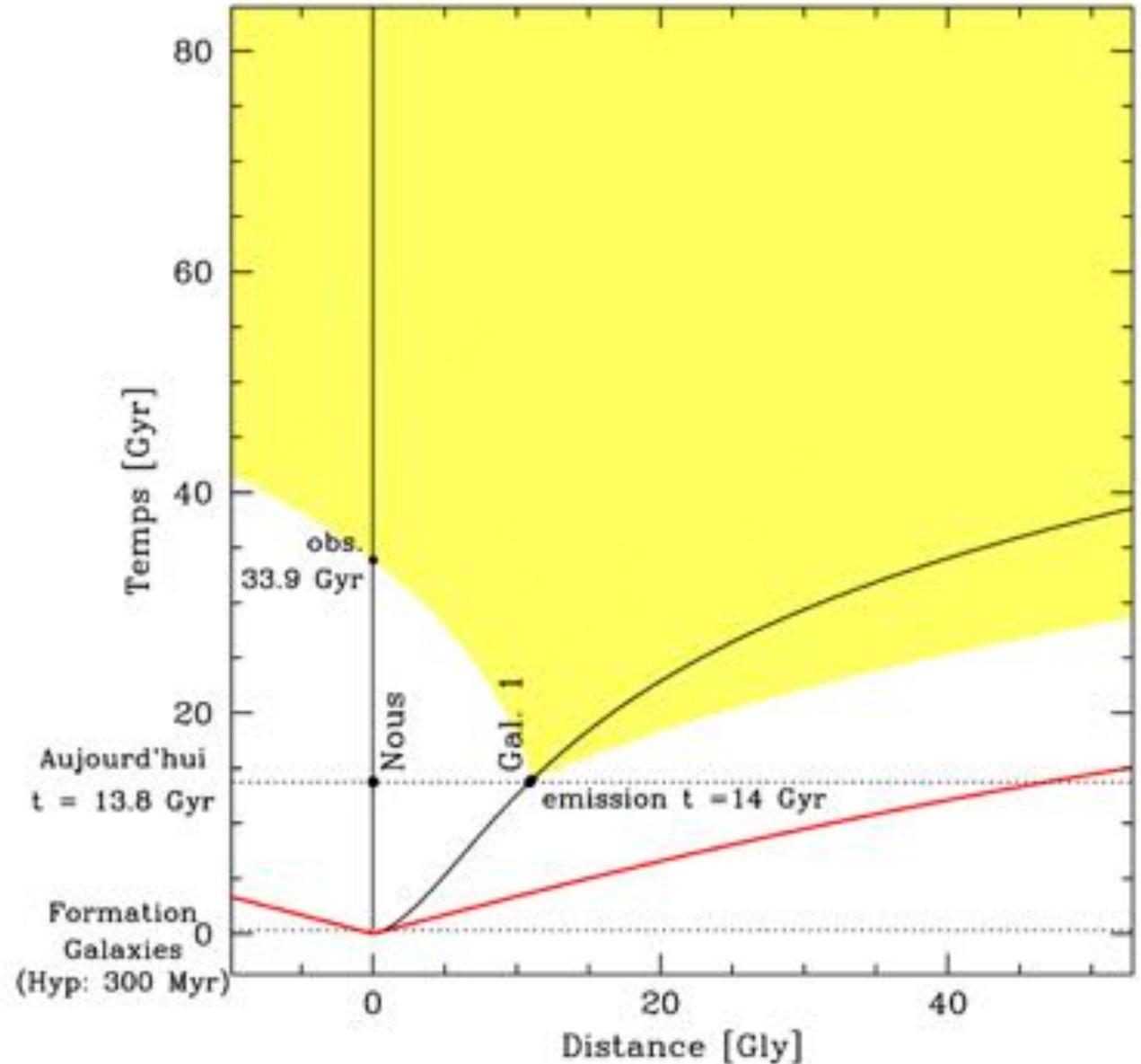
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

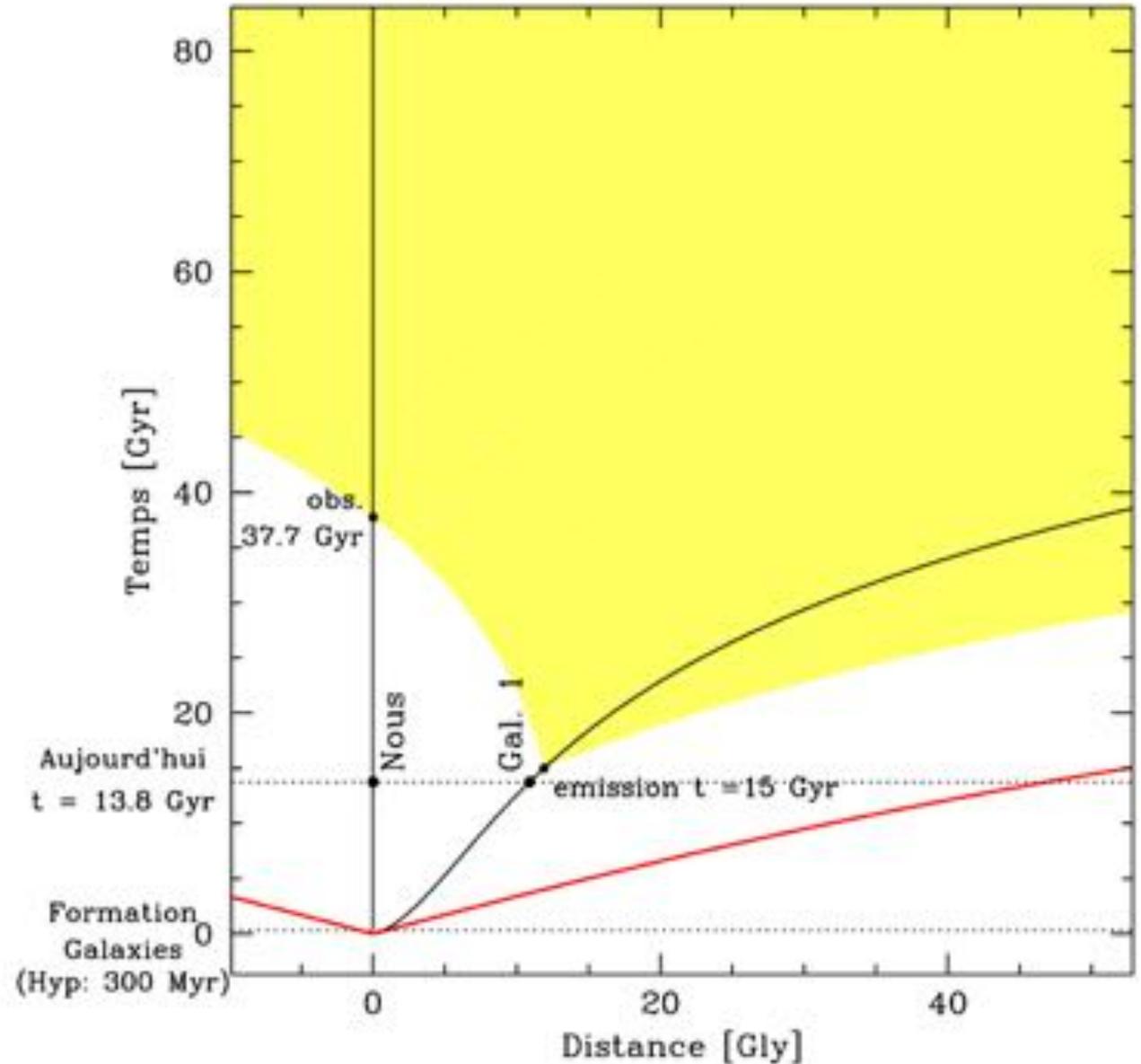
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

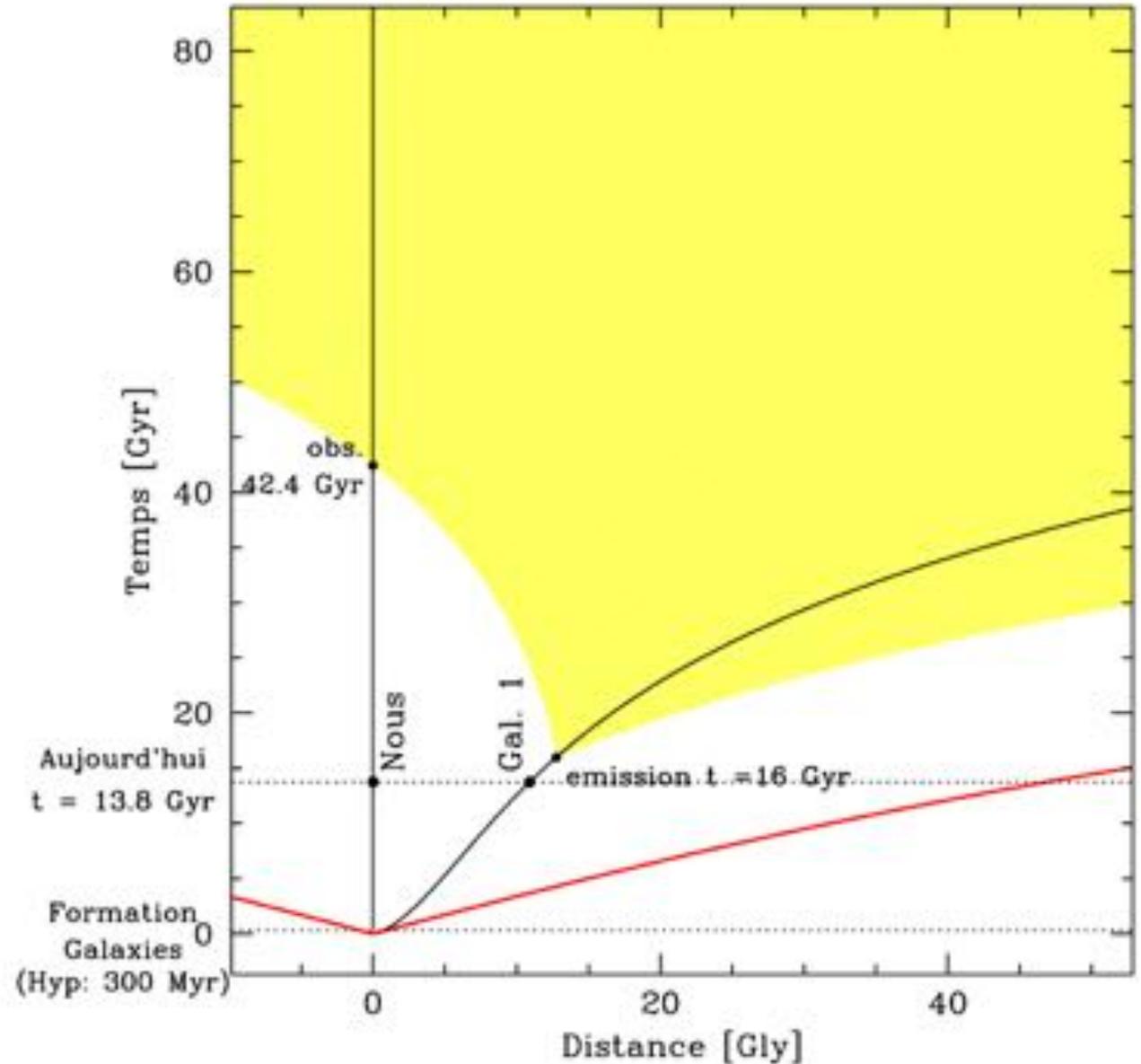
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

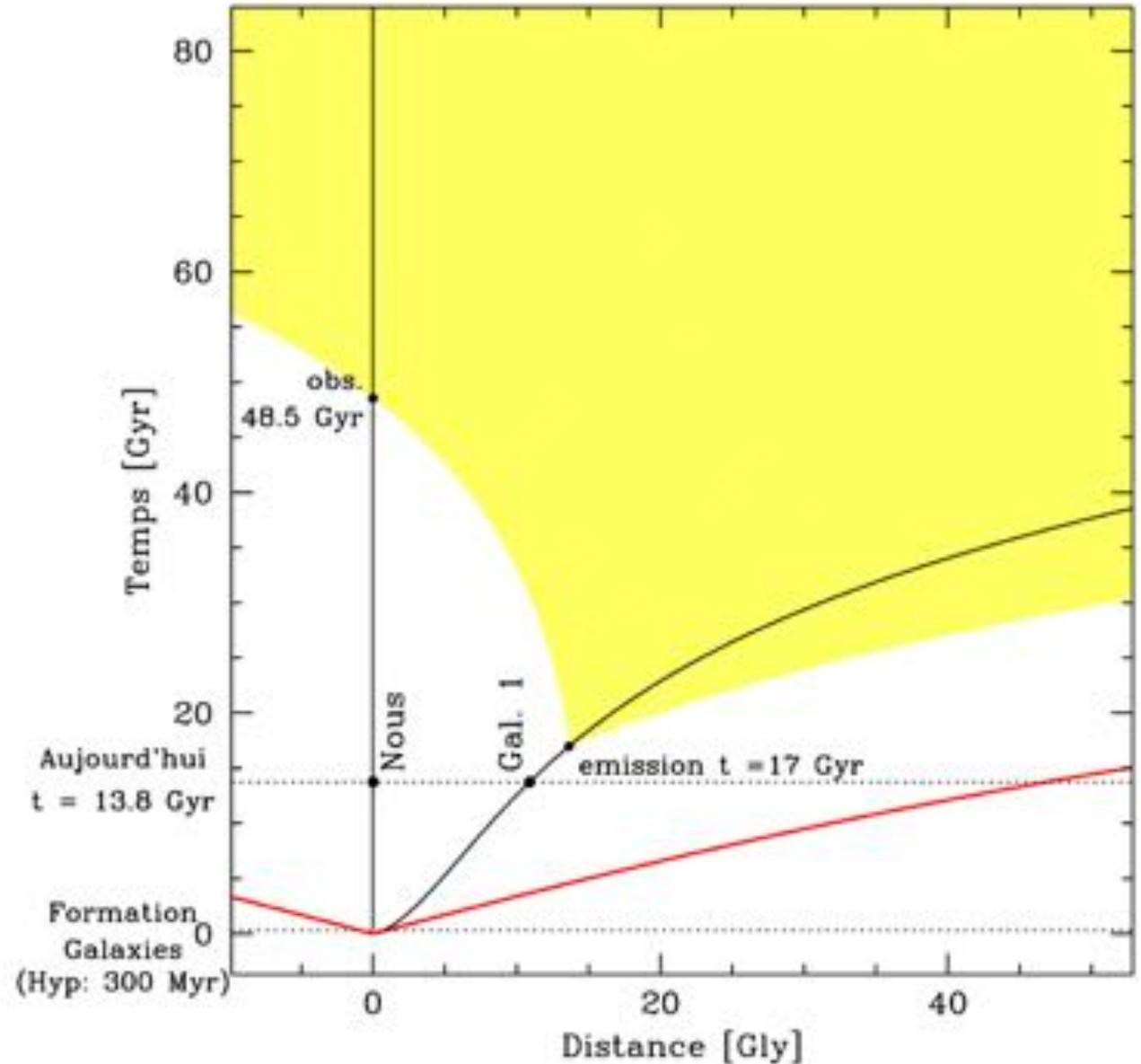
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

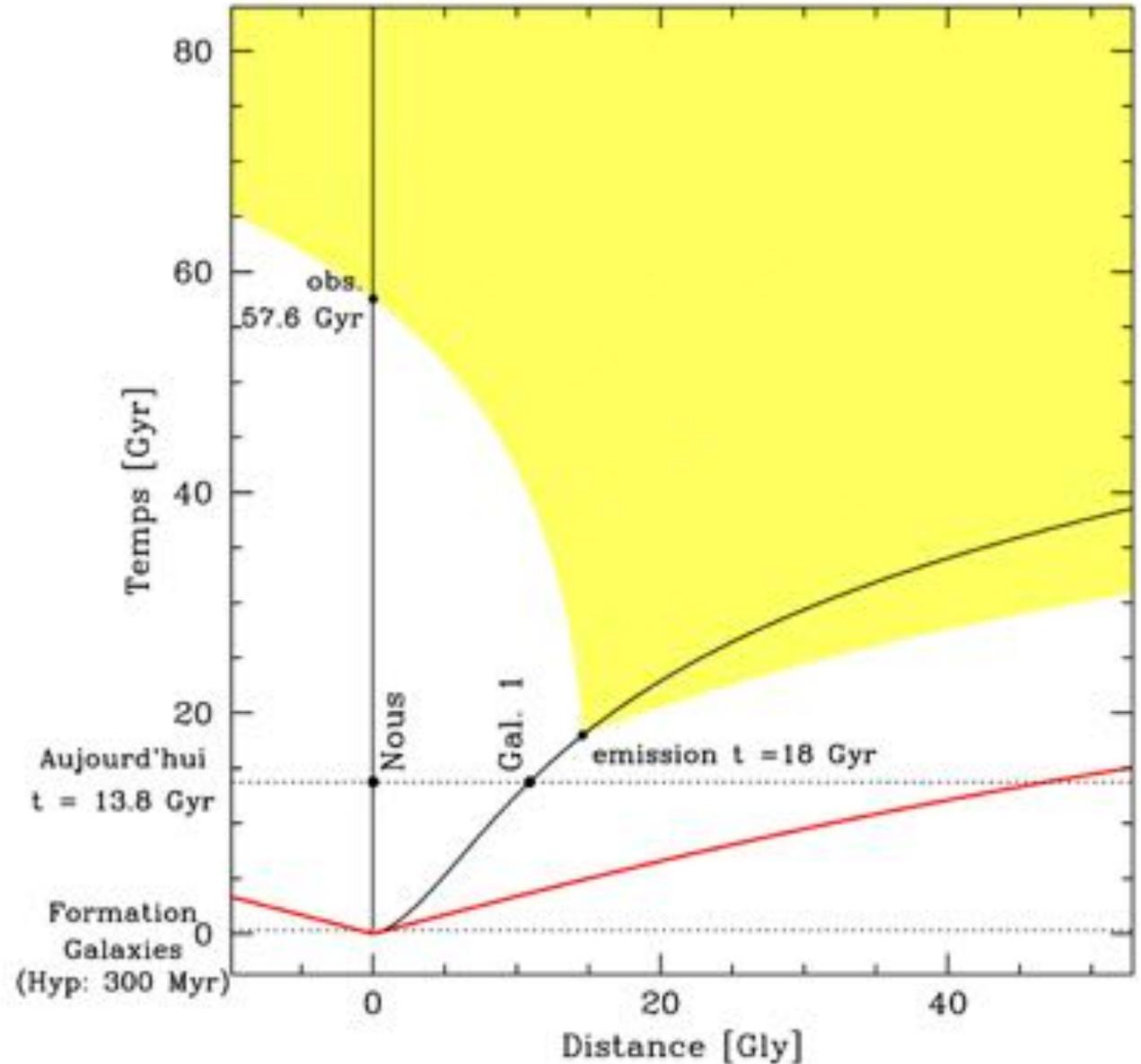
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

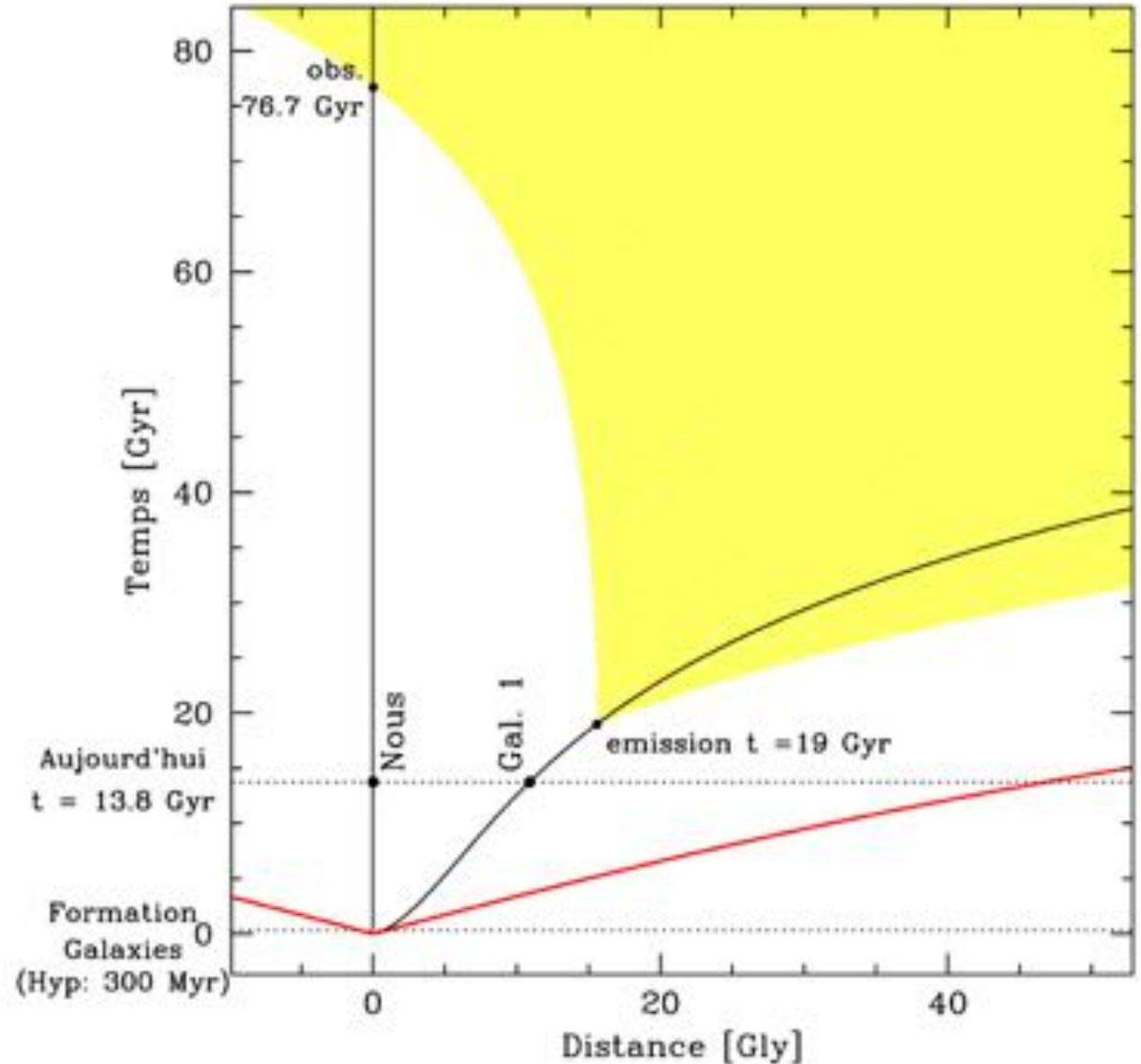
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

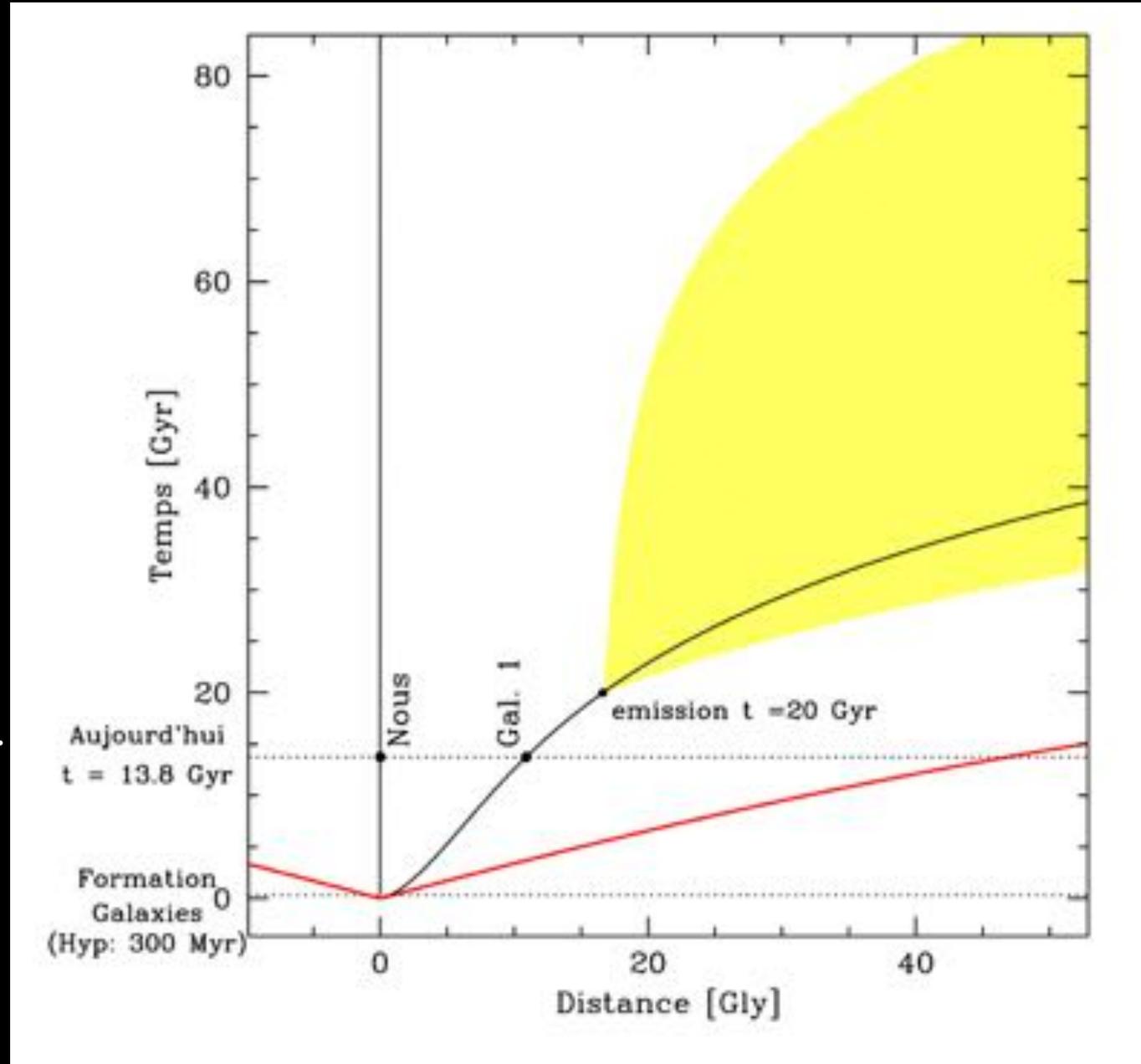
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

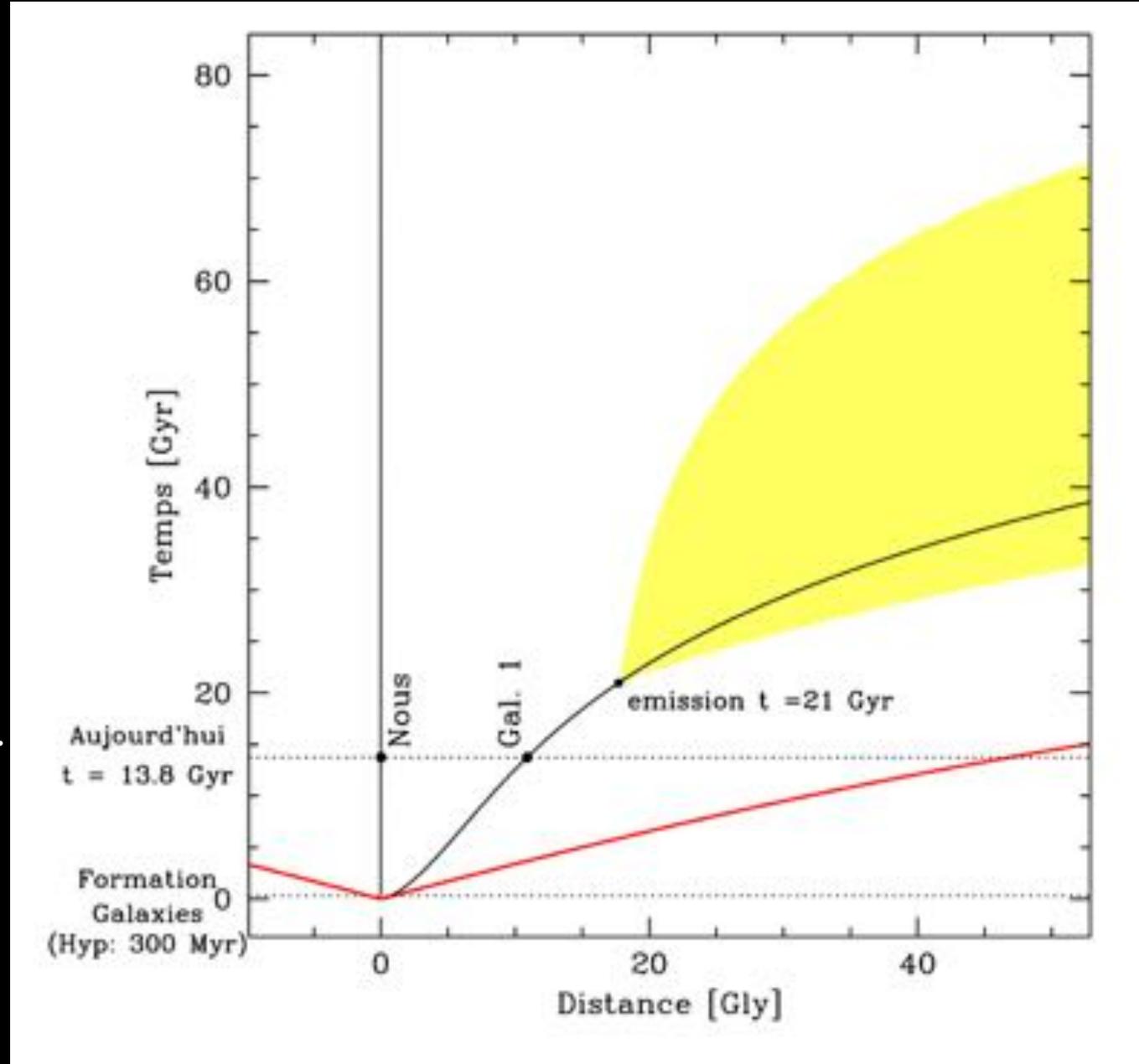
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

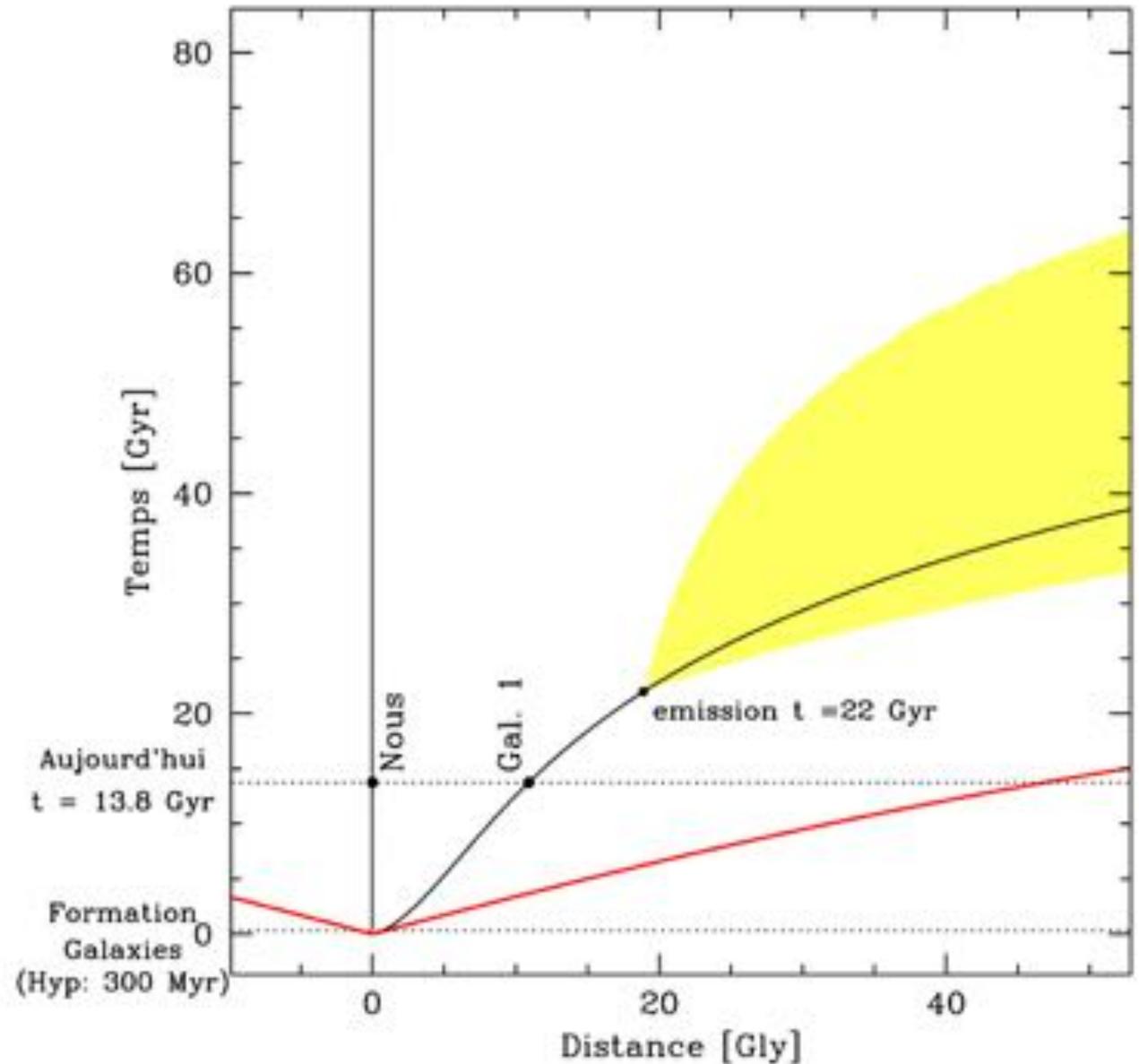
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

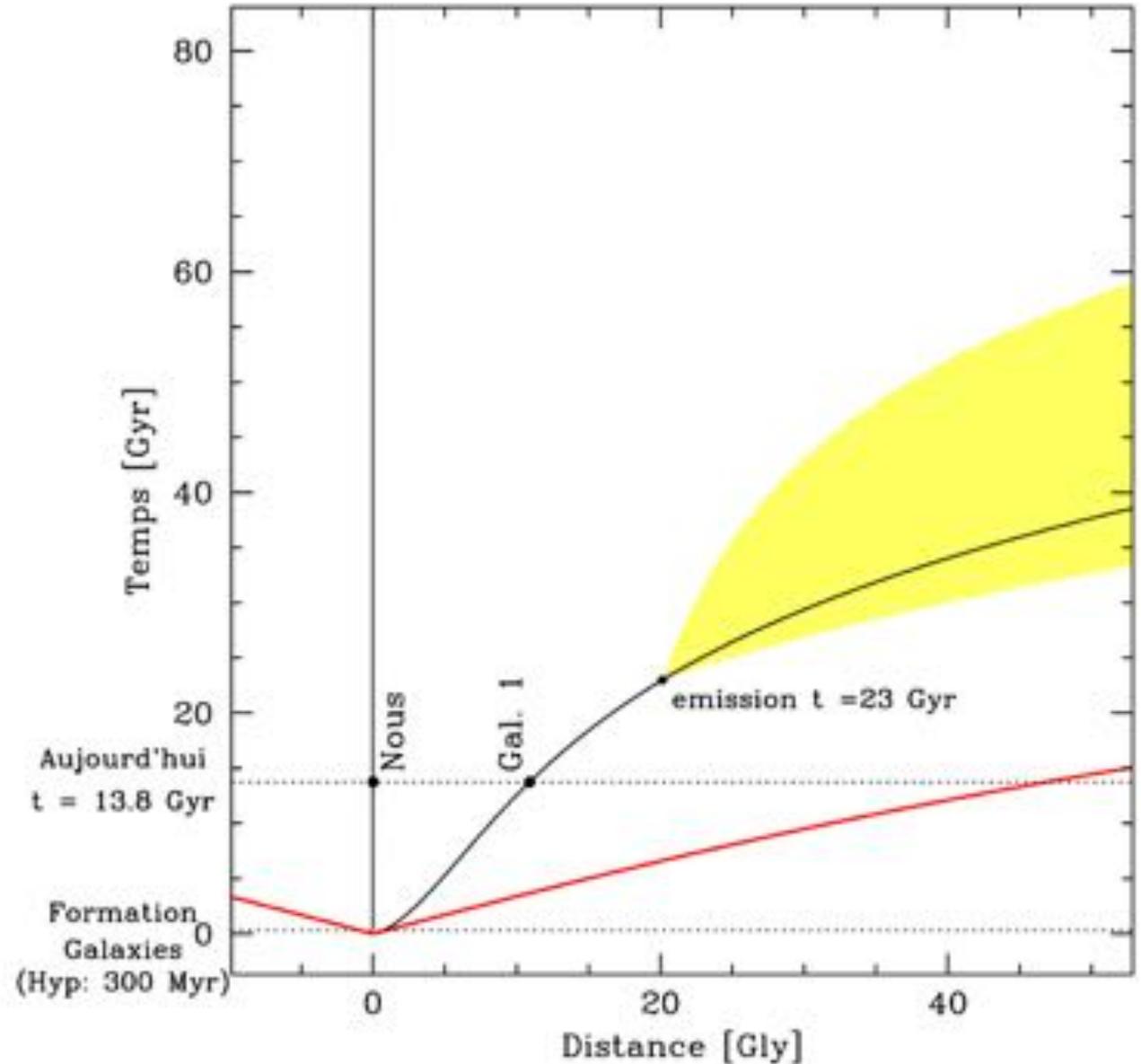
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

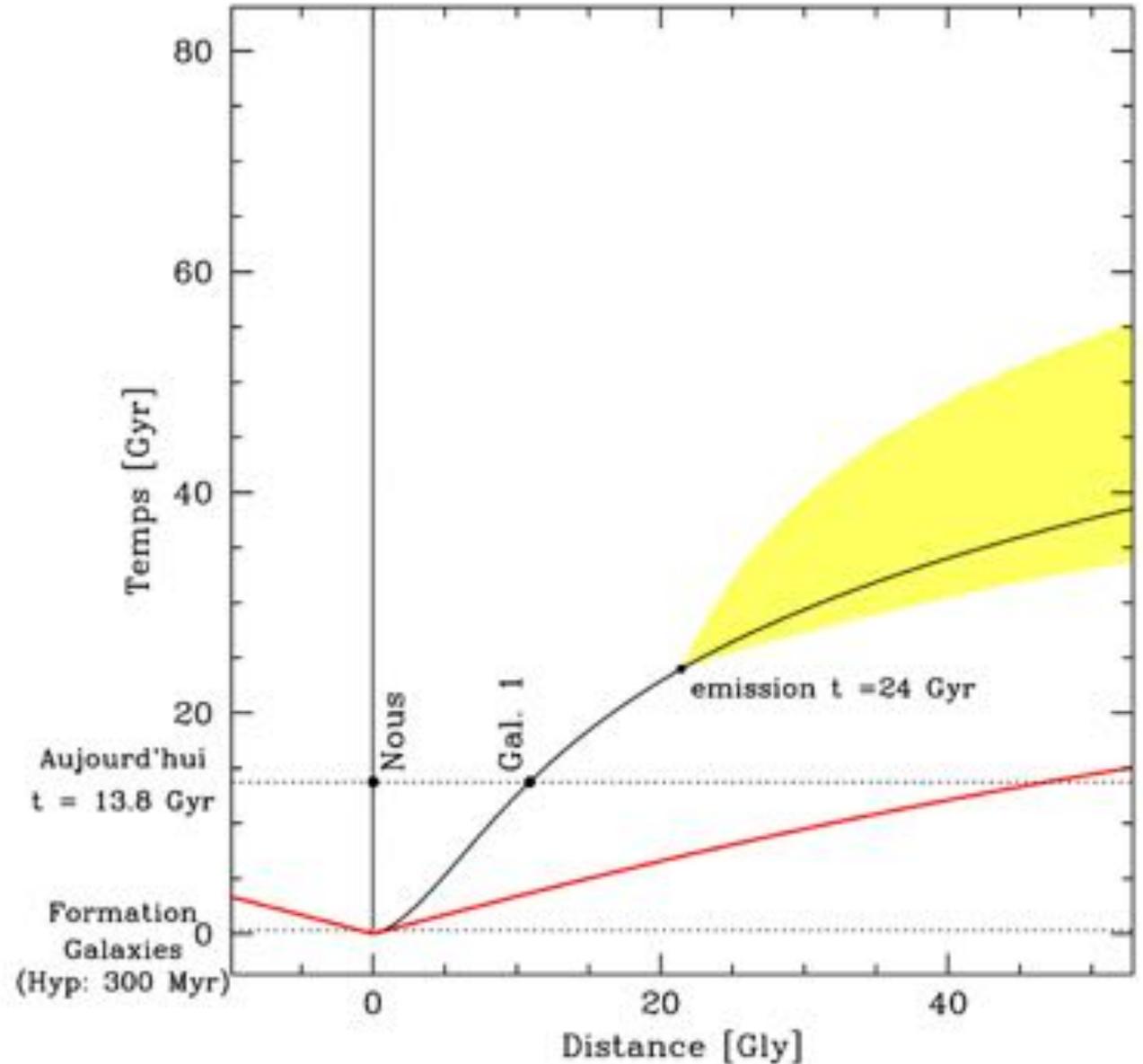
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

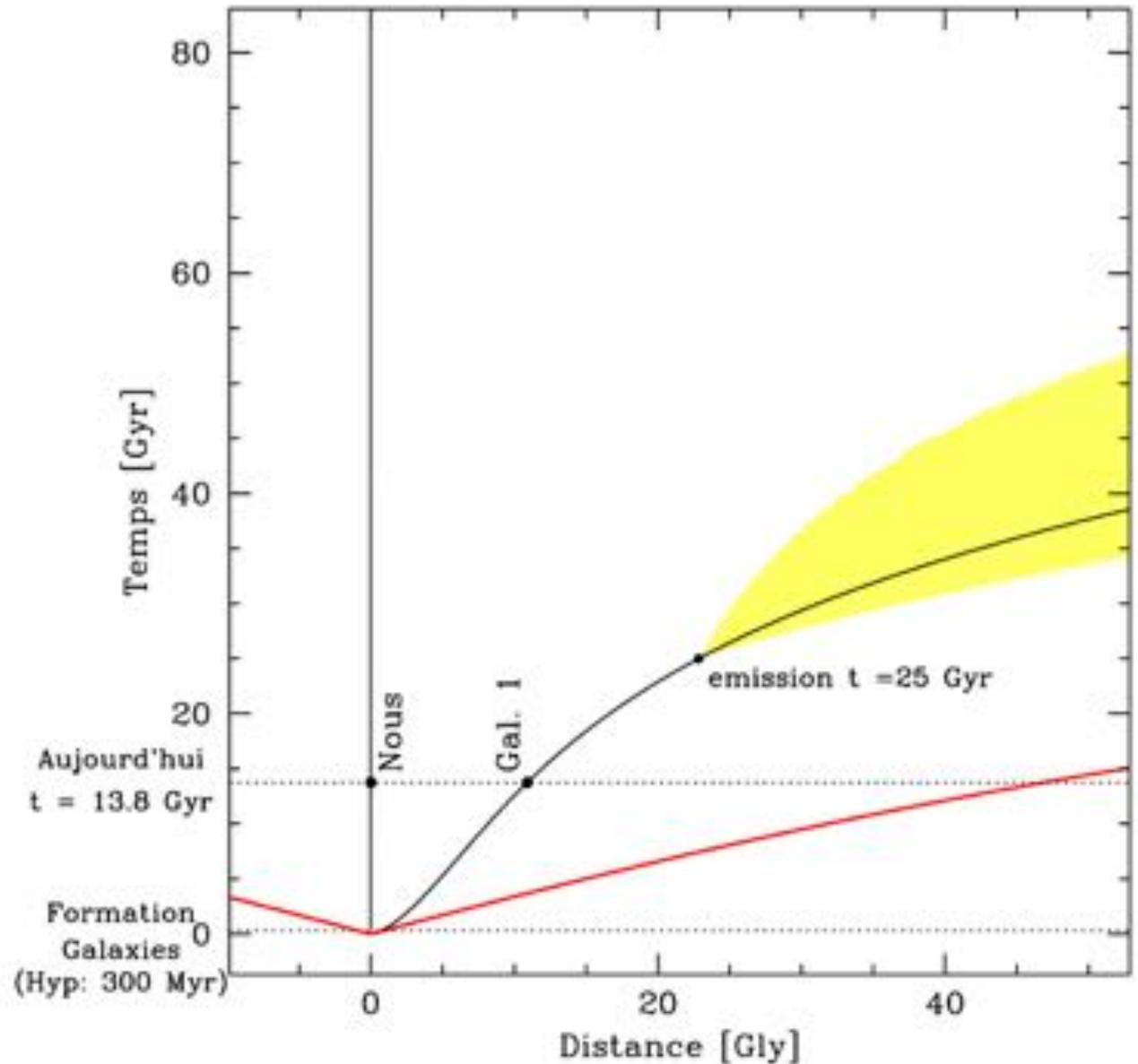
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

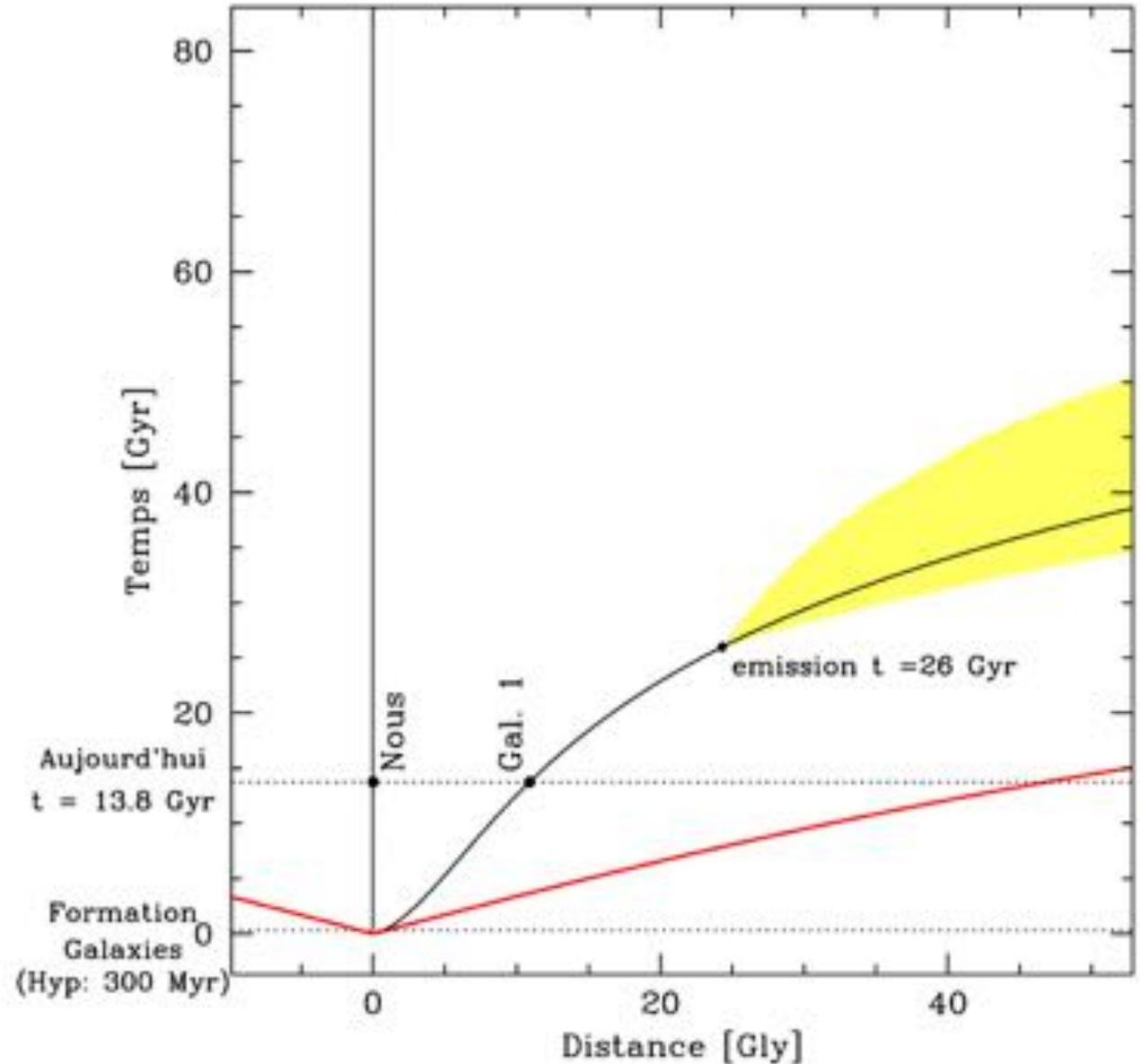
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

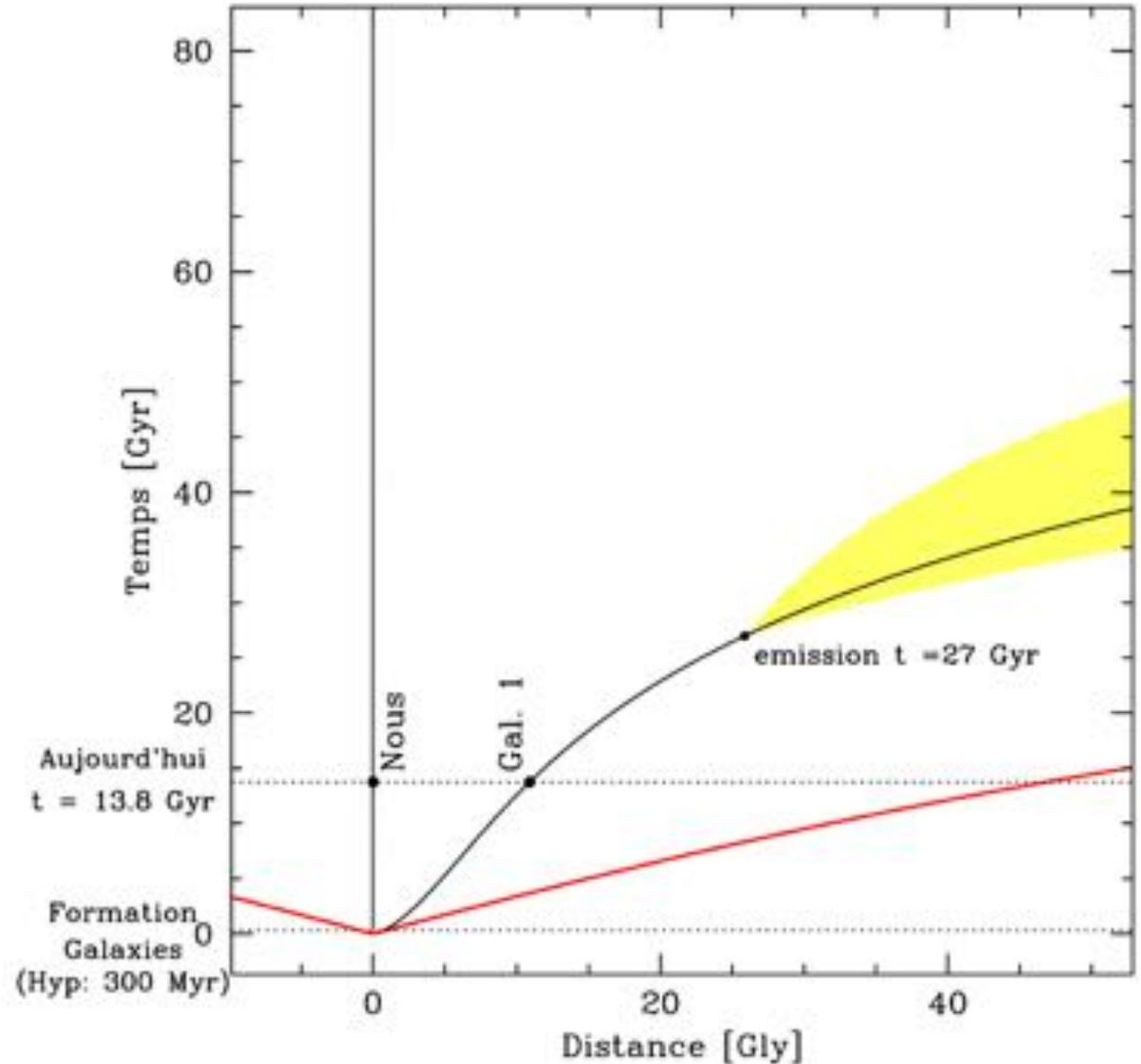
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

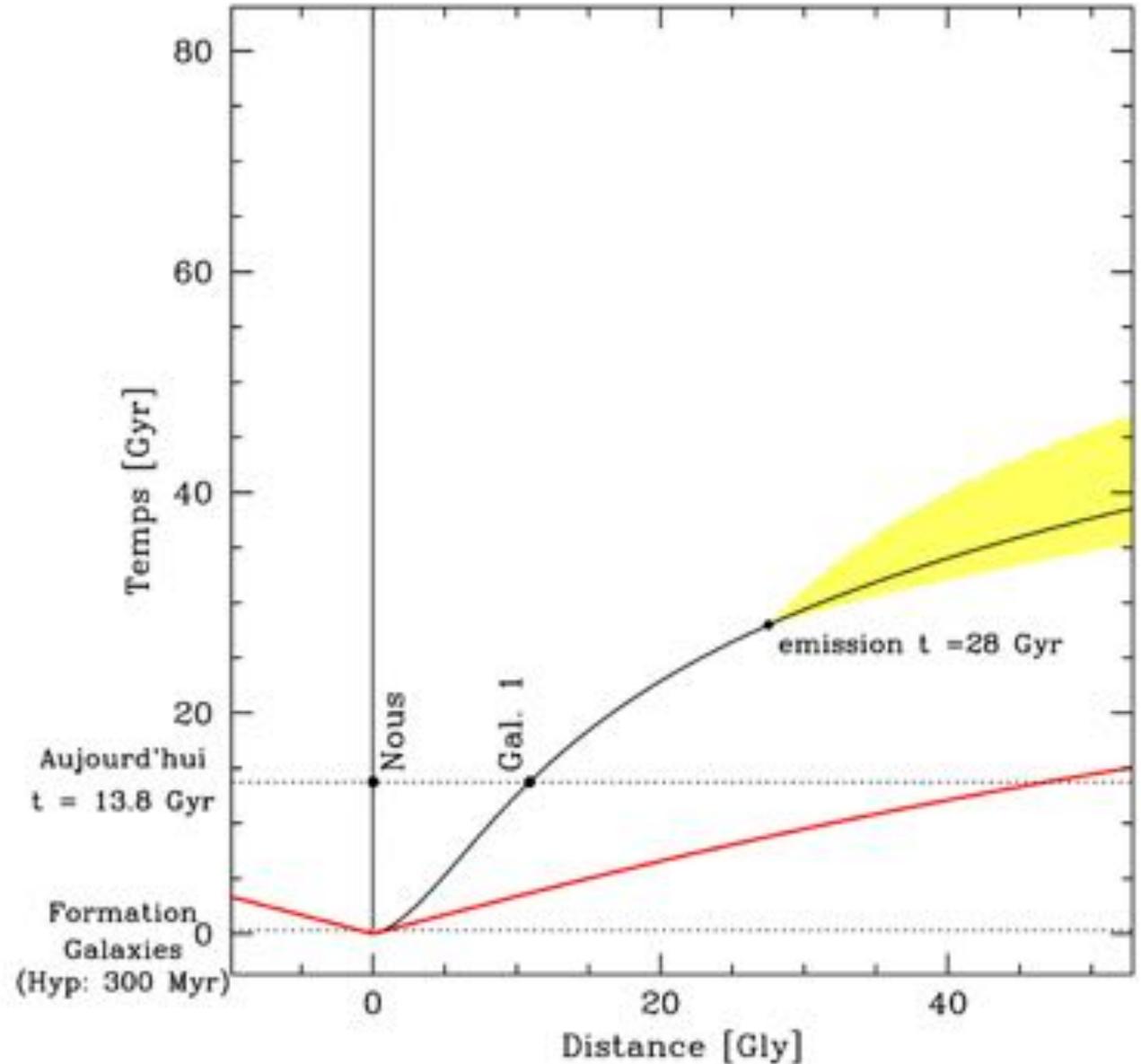
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

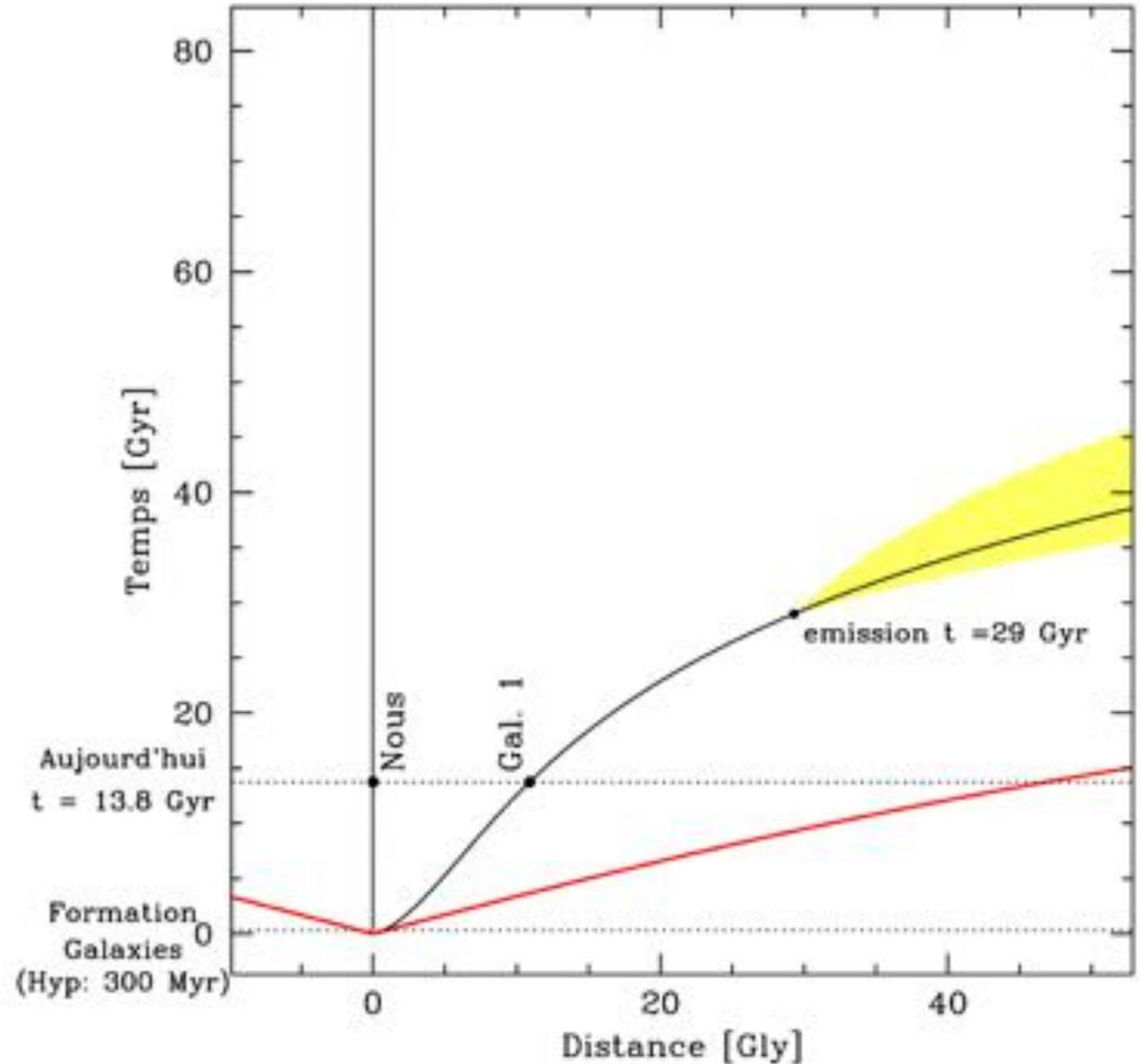
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

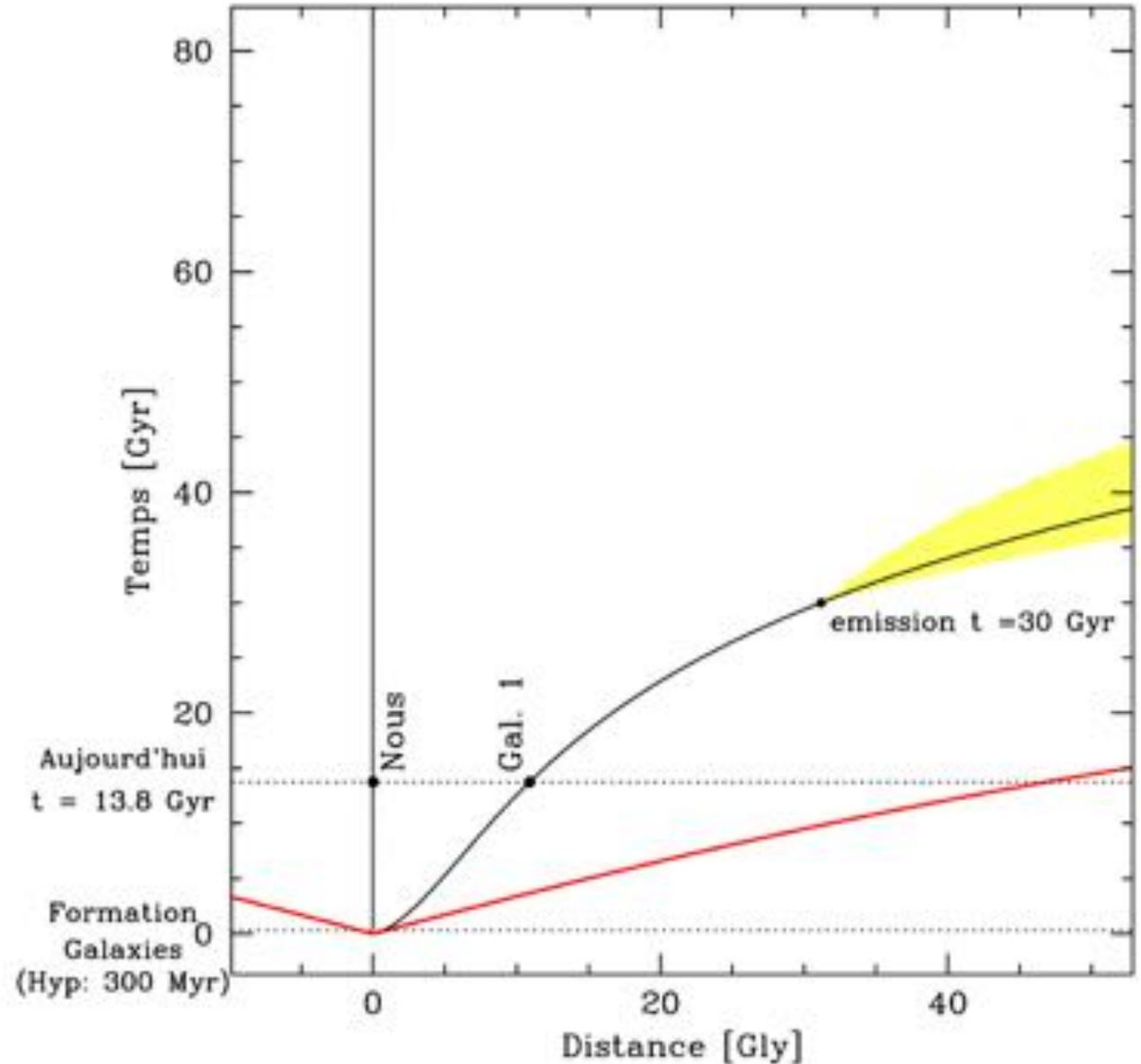
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

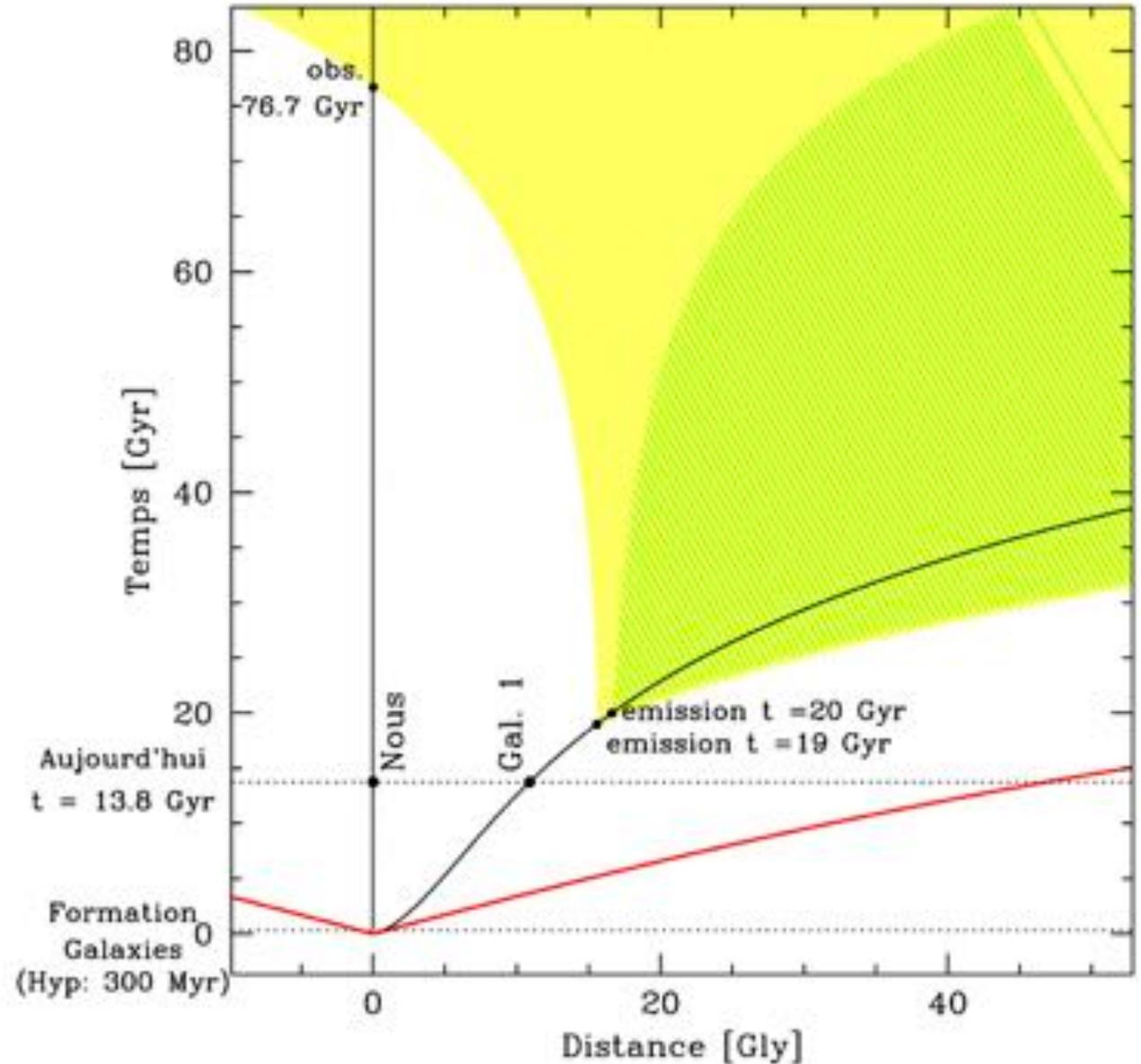
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

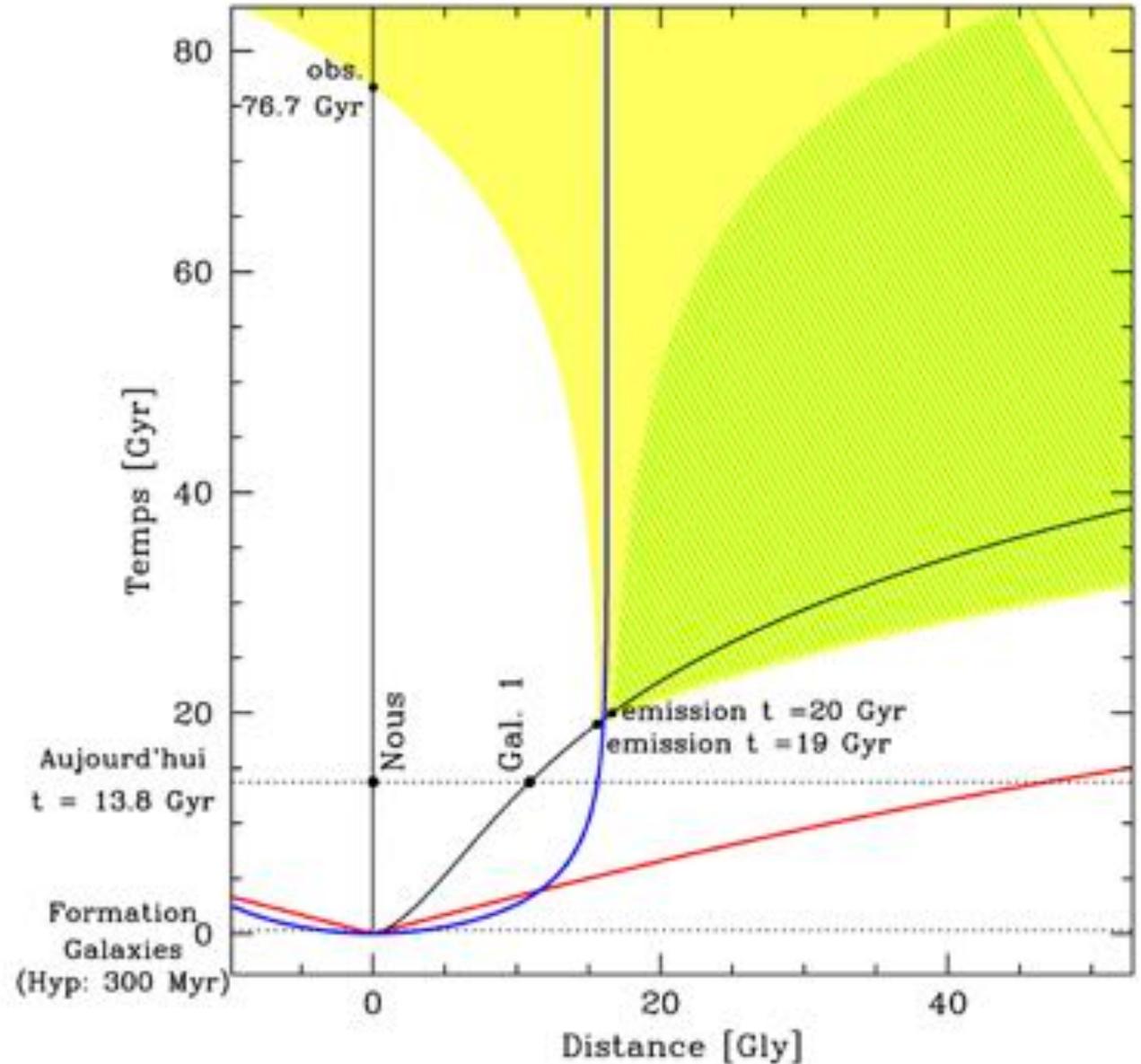
A partir d'un certain âge (19.4 Gyr), la lumière émise par la galaxie 1 ne nous parviendra jamais.



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

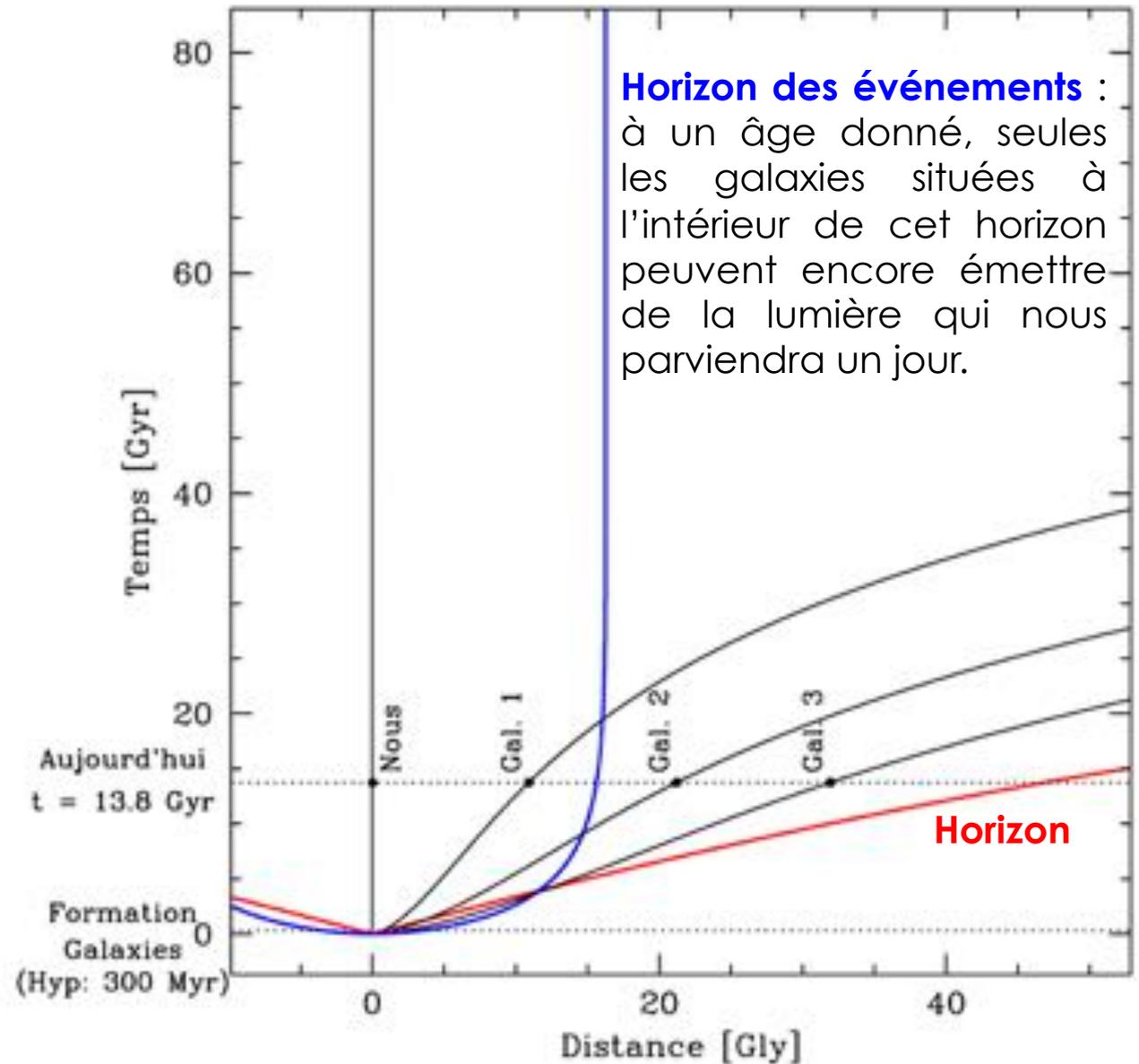
Ceci définit un « horizon des événements »



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

Ceci définit un « horizon des événements »



L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

- Toutes les galaxies finissent par sortir de notre horizon des événements.
- Dans notre ciel, elles se figent donc dans leur état à l'âge où elles sortent de cet horizon.
- Leur lumière est de plus en plus décalée vers le rouge, leur flux de plus en plus faible : elles finissent par devenir indétectables.
- Le ciel se vide : il n'y a plus aucune galaxie, à l'exception du groupe local (structure liée gravitationnellement).
- Le rayonnement fossile étant émis partout à la fois dans l'Univers, sa source ne sort pas de notre horizon des événements, mais à cause du décalage vers le rouge, il devient également indétectable.

L'Univers dans le futur

L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...

- En l'absence de galaxies lointaines, il devient impossible de mesurer l'expansion de l'Univers... Le premier pilier du *Big Bang* disparaît.
- En l'absence de rayonnement fossile, le deuxième pilier du *Big Bang* disparaît aussi.
- Le troisième pilier du *Big Bang* demeure, mais l'évolution chimique due aux étoiles le rend de plus en plus difficile à identifier.
- La cosmologie devient impossible : le modèle le plus raisonnable est celui d'un Univers île réduit à la Galaxie (Andromède et la Voie Lactée auront fusionné à cette époque), comme au début du XX^{ème} siècle, avant l'identification de la nature des nébuleuses spirales !

Résumé du cours n°11

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble : structure et évolution. La cosmologie moderne repose sur trois piliers observationnels : (1) l'expansion ; (2) le rayonnement fossile ; (3) la composition chimique de l'Univers.

La théorie du *Big Bang* explique ces trois observations fondamentale – et beaucoup d'autres – formant une description de l'Univers d'une très grande cohérence. Elle se fonde sur la relativité générale à laquelle on ajoute le *principe cosmologique* : l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle. Elle décrit alors naturellement un Univers en expansion, qui se refroidit et passe par différentes transitions, dont la nucléosynthèse primordiale (~ 3 min) et l'émission du rayonnement fossile ($\sim 380\,000$ ans). L'Univers a une histoire !

La physique dont nous disposons n'est pas capable de décrire ce qui se passe pour $t < 10^{-43}$ s. On ne sait donc pas s'il y a vraiment un « *Big Bang* » (singularité initiale). Cela ne remet pas en question la théorie qui s'applique au 13,8 milliards d'années qui suivent.

De très faibles fluctuations initiales de densité sont amplifiées par la gravité au cours de l'histoire de l'Univers, ce qui conduit à la formation des structures observées dans l'Univers actuel : galaxies, groupes, amas, super-amas, ...

Pouvoir décrire l'Univers avec une telle précision est un impressionnant succès pour la pensée humaine. De nombreuses questions, certaines très fondamentales, restent cependant ouvertes. La question de la nature de la matière noire et de l'énergie noire n'est pas la moindre d'entre elles...

Prochains cours



Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
 2. Notre étoile, le Soleil
 3. De la lunette de Galilée
aux télescopes spatiaux :
l'observation en astronomie
 4. Panorama du système solaire
 5. A la recherche d'autres mondes,
les exoplanètes
 6. Vie et mort des étoiles
 7. Explosions et monstres cosmiques :
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
 8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles
 9. La Voie Lactée et les galaxies proches
 10. L'Univers lointain
 11. La cosmologie moderne :
un Univers en évolution
 12. Conclusion :
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

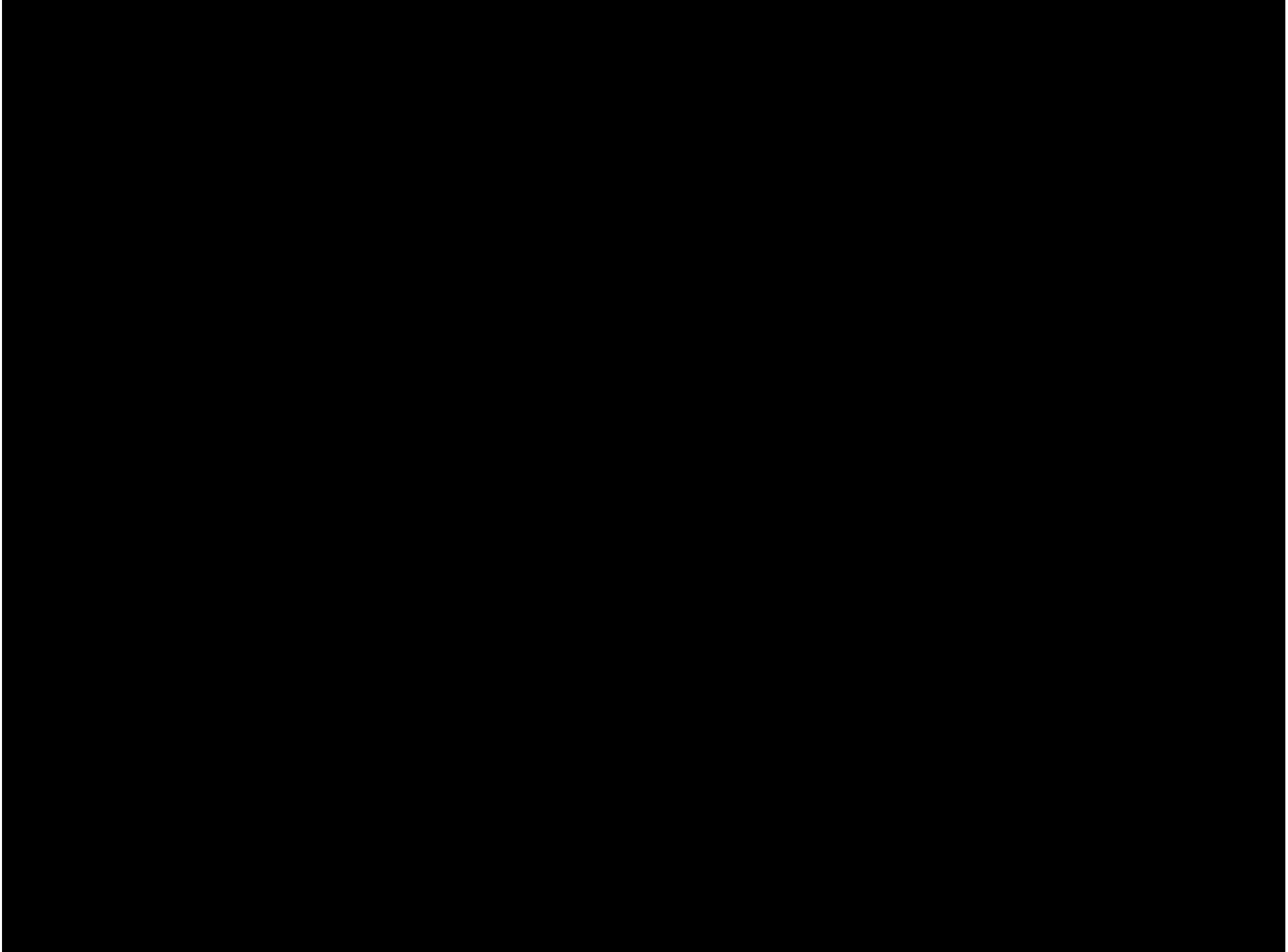
Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr



L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

■ Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

- L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...

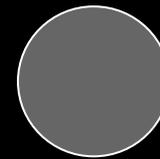
- Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



Région 1 émettant
un signal à t



Région 2 émettant
un signal à t



Taille de
l'horizon de Hubble à t

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

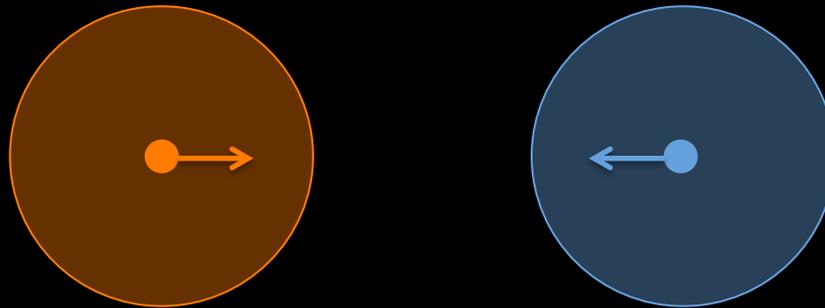
■ Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

- L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...

- Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



L'Univers vieillit...

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

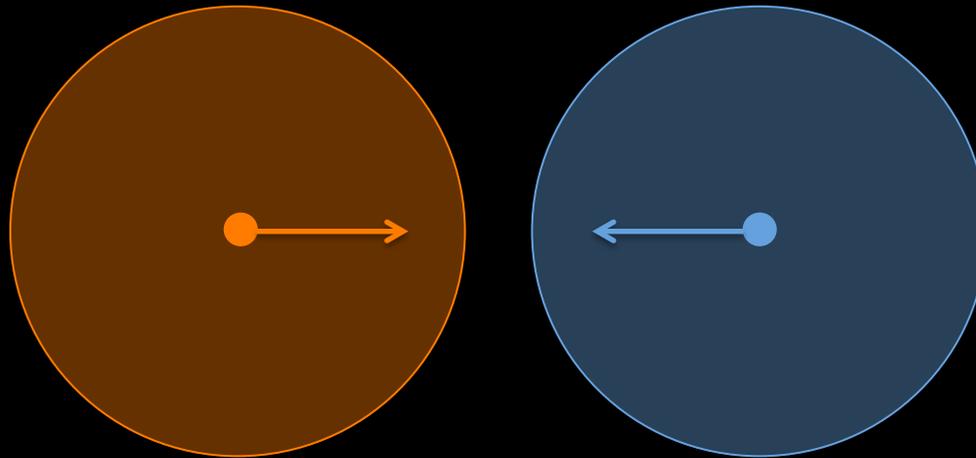
■ Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

- L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...

- Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



L'Univers vieillit... L'horizon grandit, le signal lumineux se propage.

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

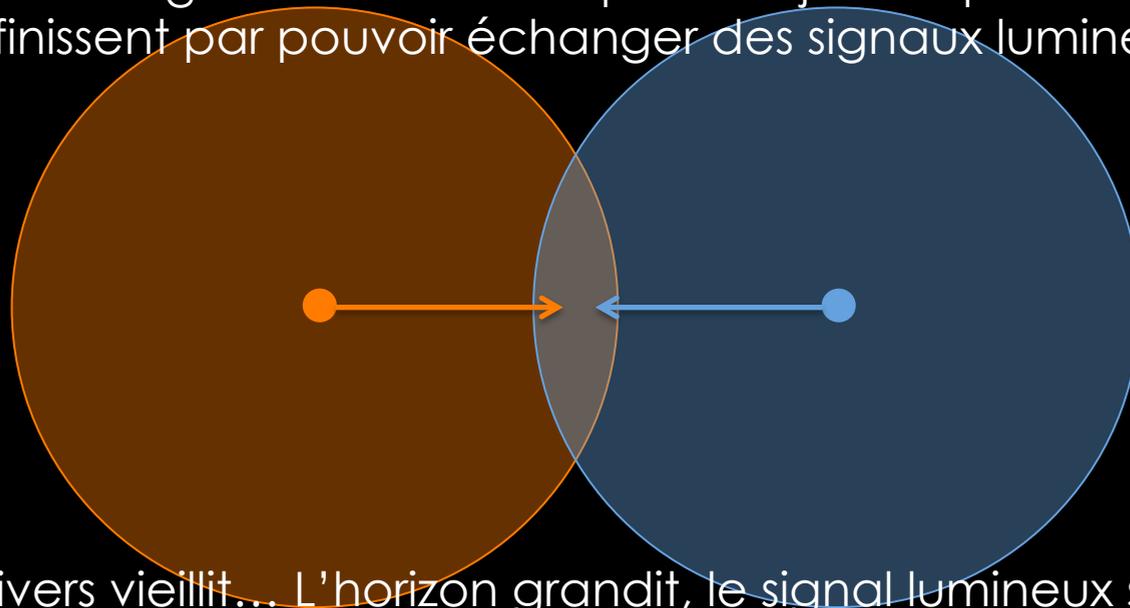
■ Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

- L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...

- Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



L'Univers vieillit... L'horizon grandit, le signal lumineux se propage.

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

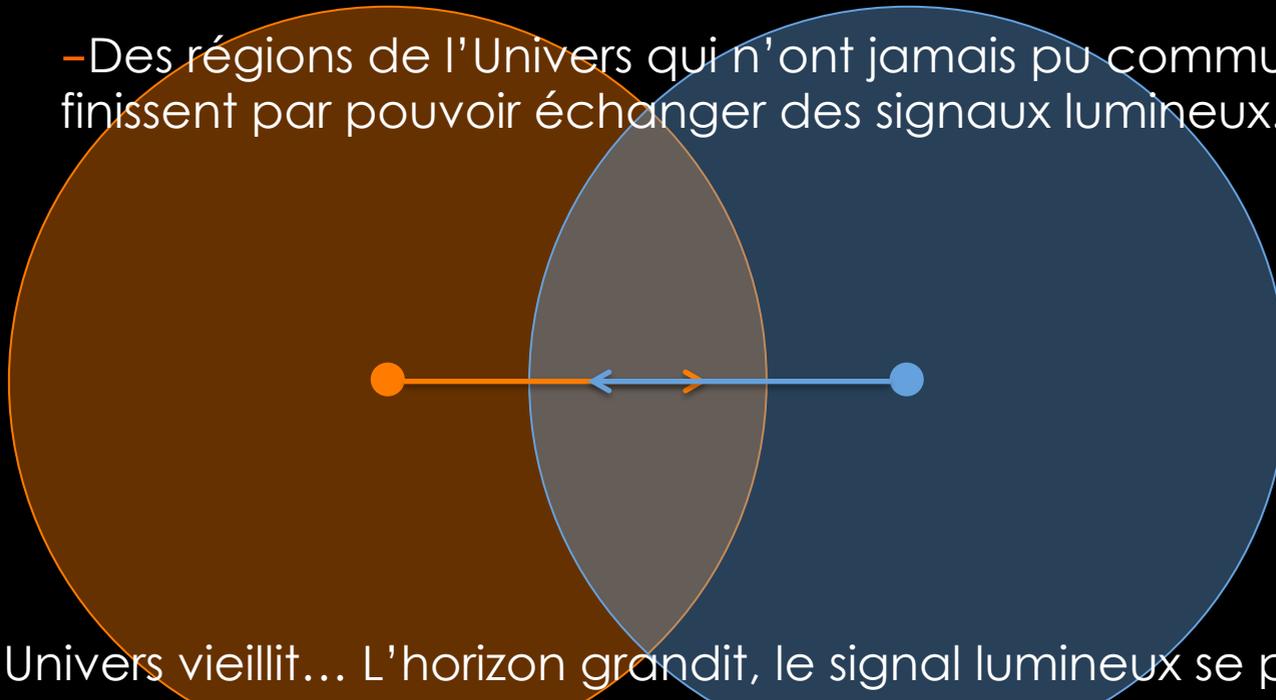
■ Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

- L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...

- Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



L'Univers vieillit... L'horizon grandit, le signal lumineux se propage.

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

- Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

- L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...

- Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



L'Univers vieillit... L'horizon grandit, le signal lumineux se propage.

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

-Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir

-L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...

-Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



Les deux régions entrent dans leurs horizons respectifs : si elles avaient émis un signal à $t=0$, elles auraient pu échanger ainsi de l'information

L'expansion de l'Univers

L'expansion est la première des 3 observations fondamentales sur lesquelles se fonde la cosmologie moderne. Elle a été découverte par Hubble en 1929.

■ Le fait que l'Univers a un âge implique que l'existence d'un horizon observationnel, l'horizon de Hubble, correspondant à une distance de l'ordre de

$$D_0 = c \times t_0 = c / H_0 = 13,6 \text{ milliards d'années lumière}$$

- Au delà de cette distance, la lumière aurait besoin d'une durée supérieure à l'âge de l'Univers pour nous parvenir
- L'horizon de Hubble augmente au fur et à mesure que l'Univers vieillit...
- Des régions de l'Univers qui n'ont jamais pu communiquer dans le passé finissent par pouvoir échanger des signaux lumineux.



Les deux régions détectent les signaux émis à t : elles ont échangé de l'information !