

Conséquences de l'expansion

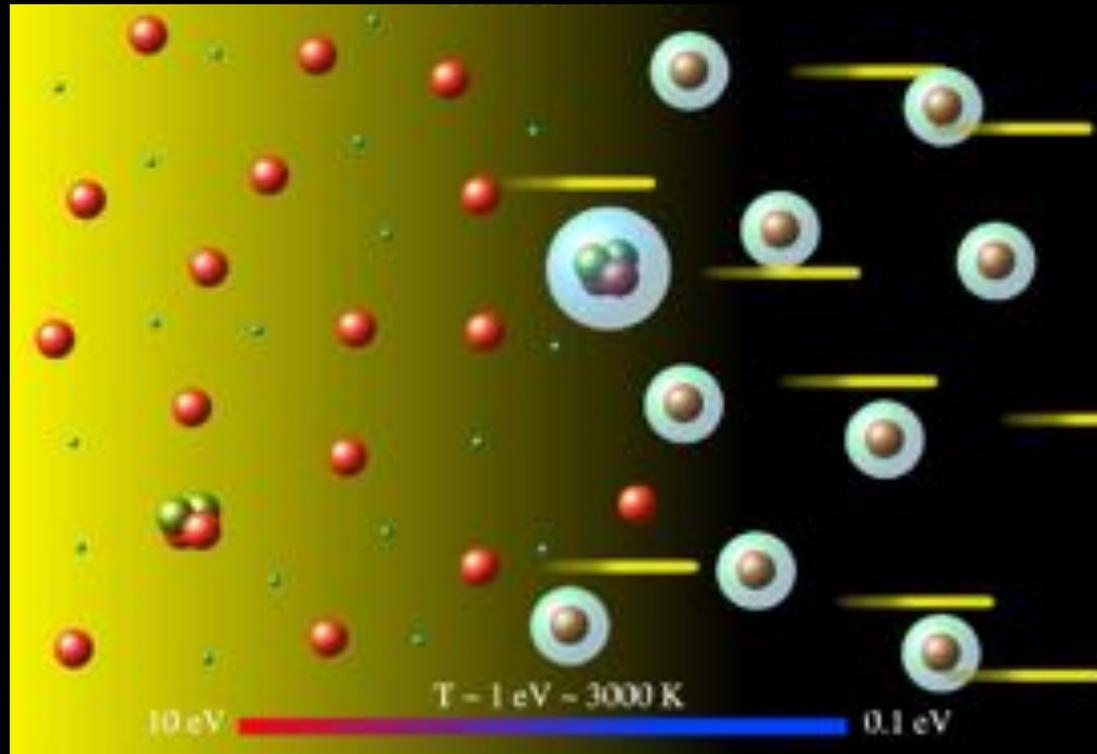
L'expansion implique que l'Univers était plus chaud et plus dense dans le passé.

- 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*.



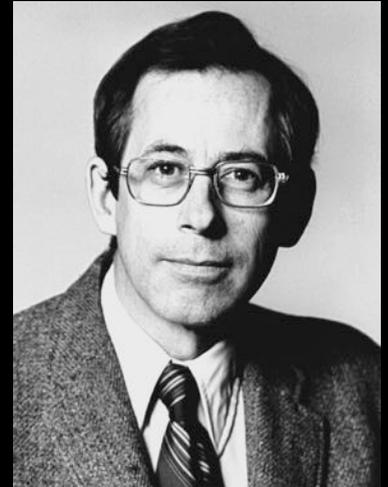
Le rayonnement fossile

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 »)



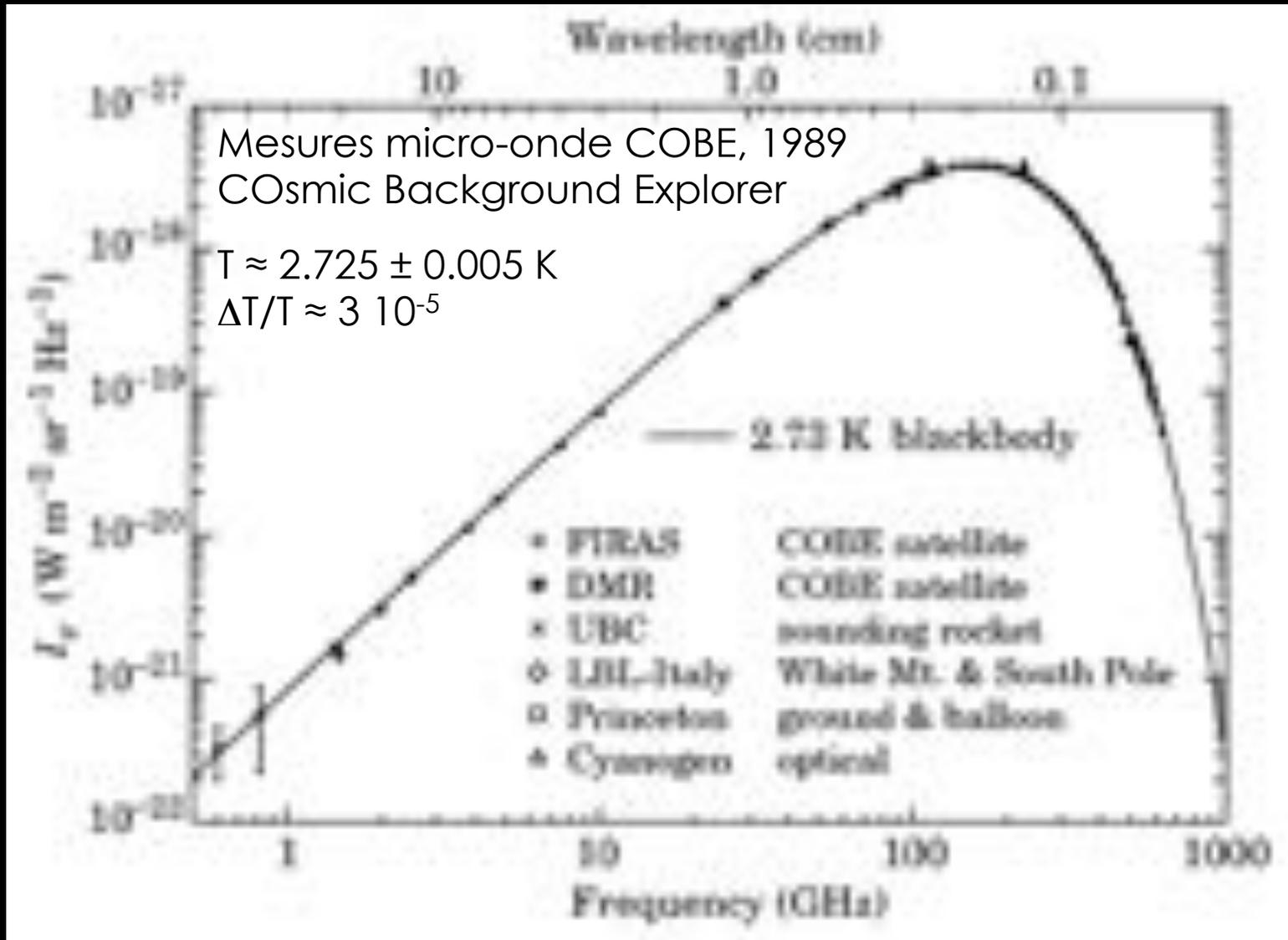
Arno Allan Penzias



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...

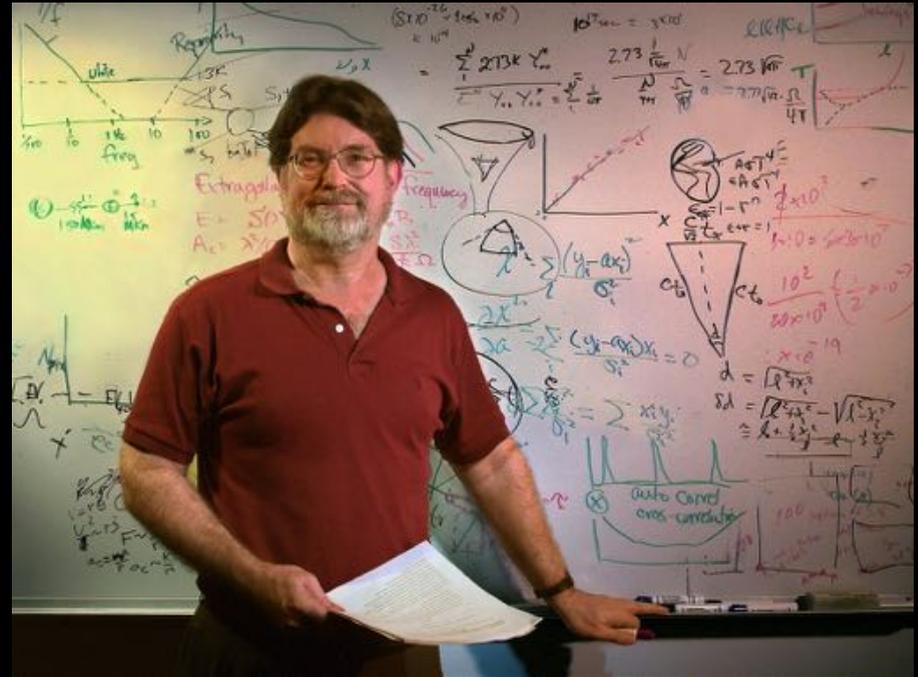
Prix Nobel de Physique 2006 :



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



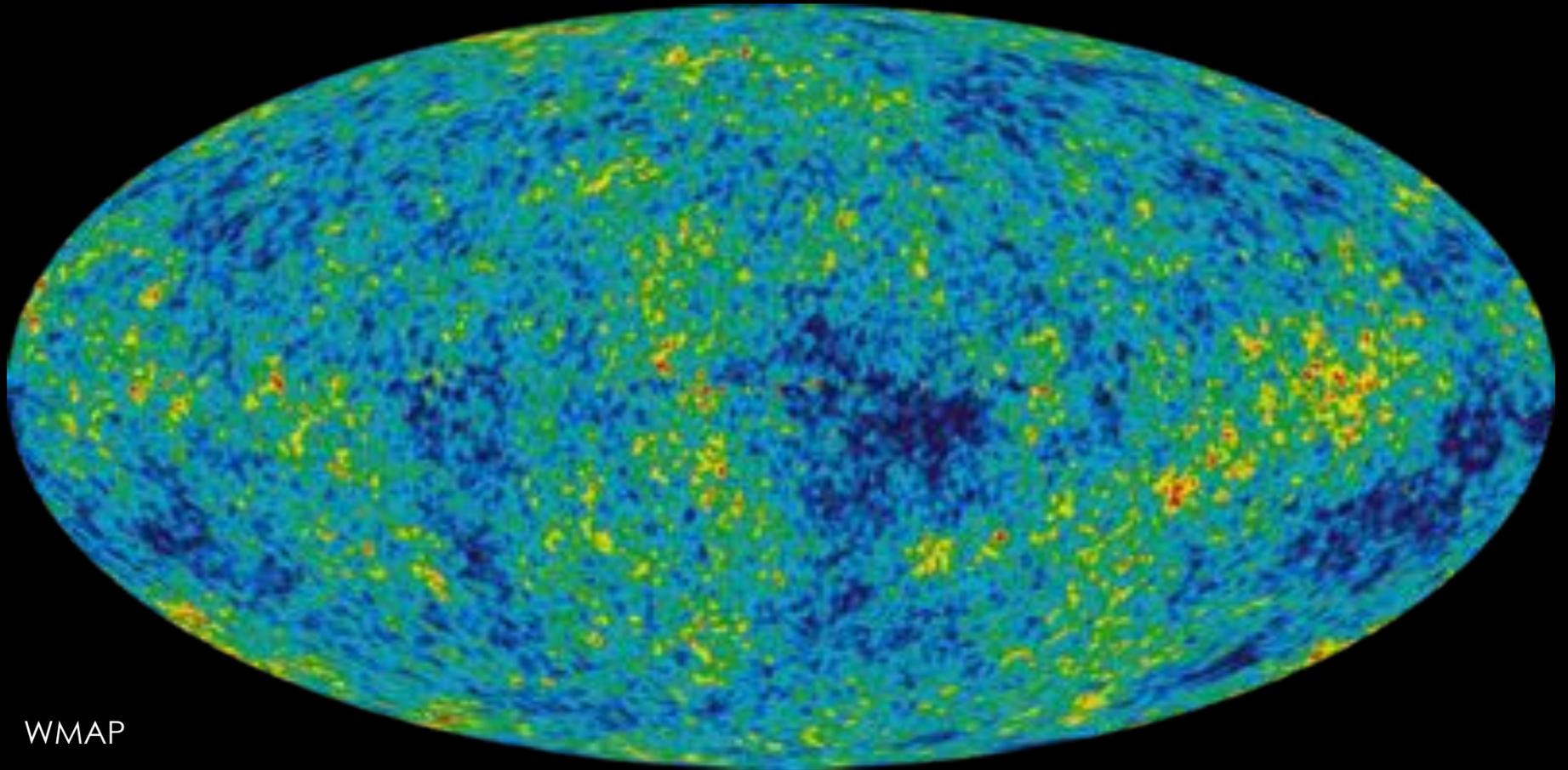
John C. Mather



George F. Smoot

Les anisotropies du rayonnement fossile

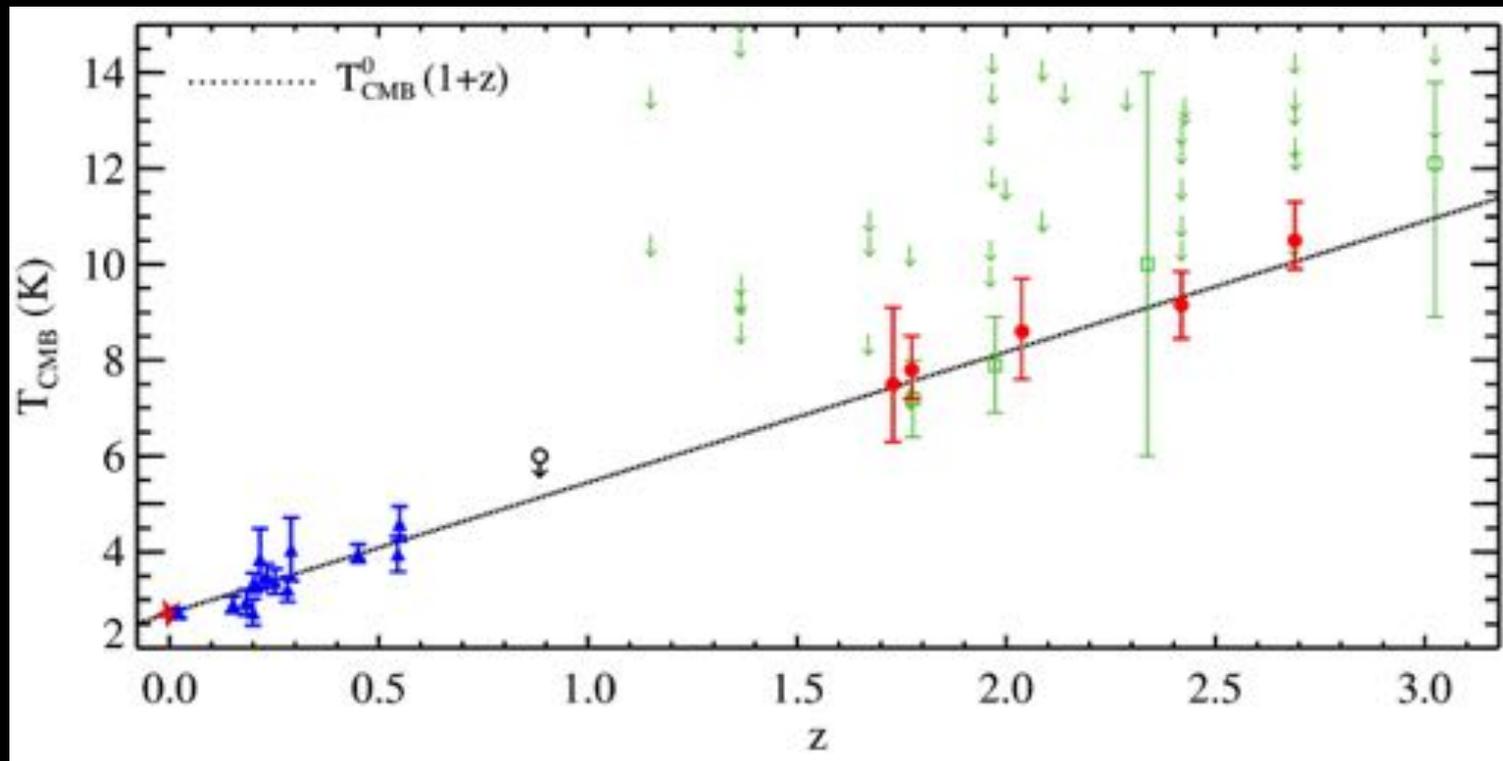
La température varie d'une direction à l'autre. Ces variations sont de l'ordre de 0,005 % seulement !



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...

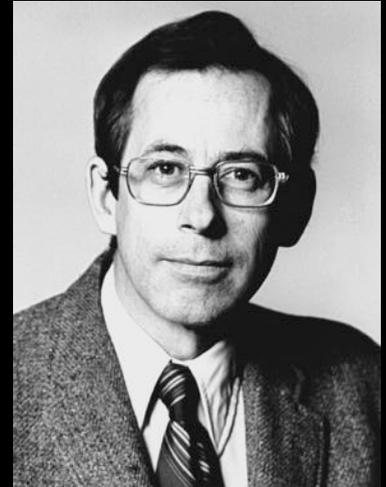
La nucléosynthèse primordiale

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)



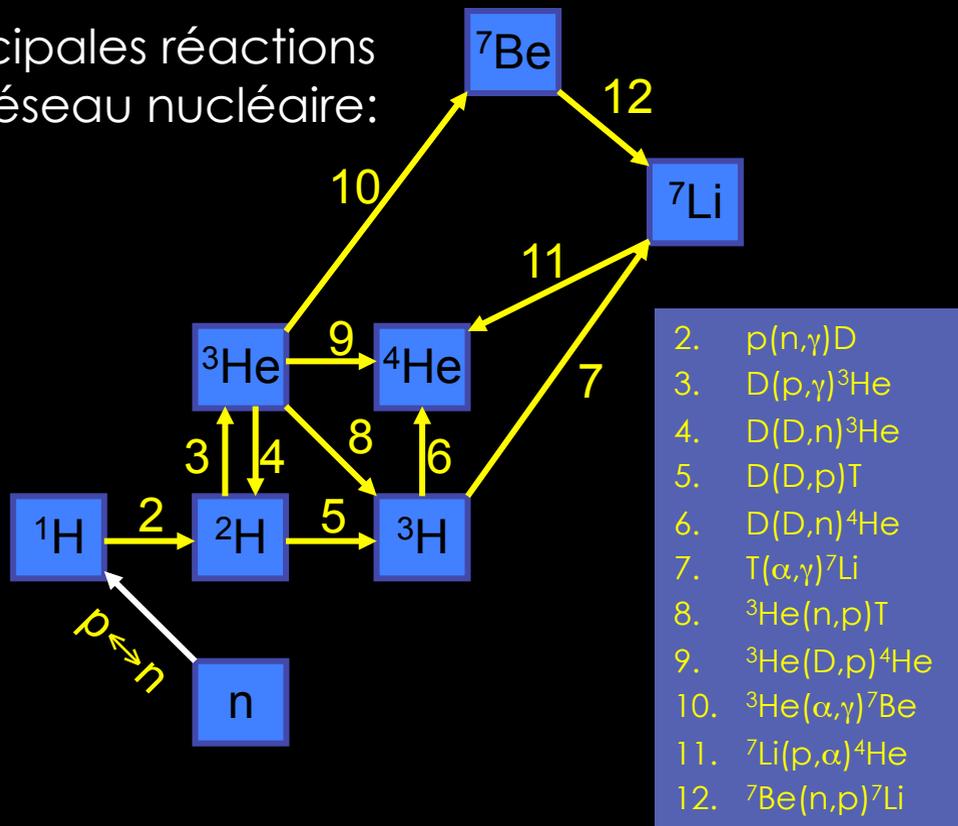
J. Peebles (1935-)

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

La nucléosynthèse primordiale

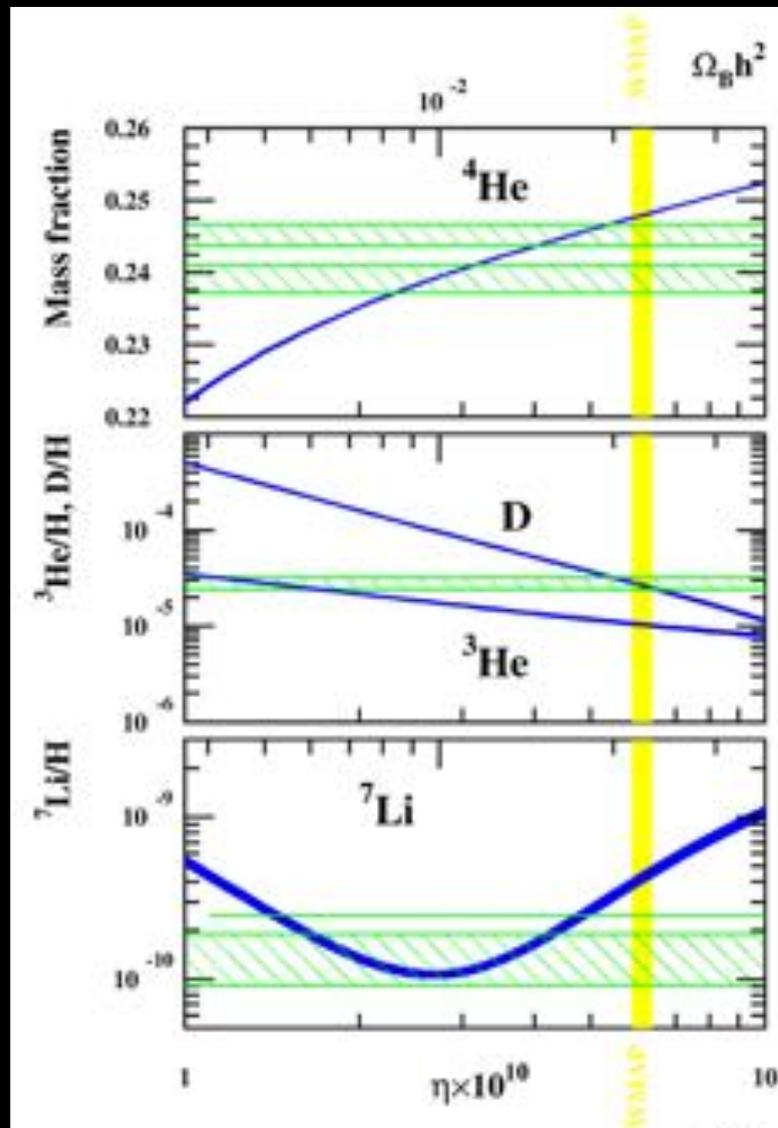
Un exemple de calcul détaillé (E. Vangioni et al. 2003, IAP).

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]

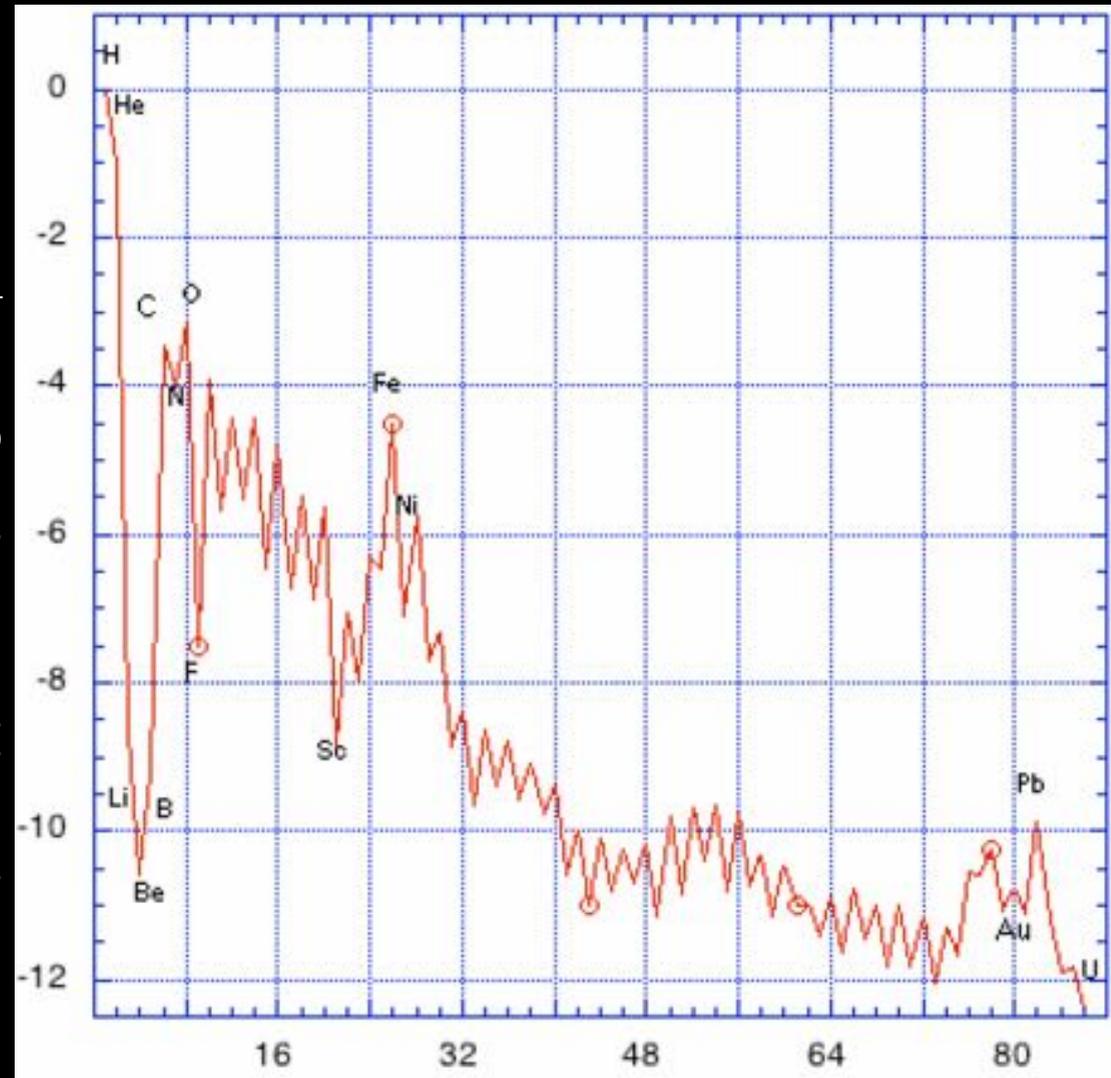


La composition chimique actuelle de l'Univers

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

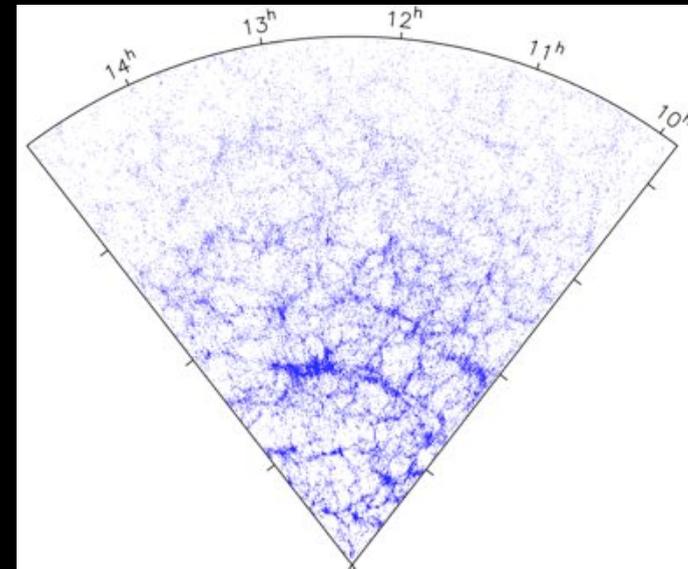
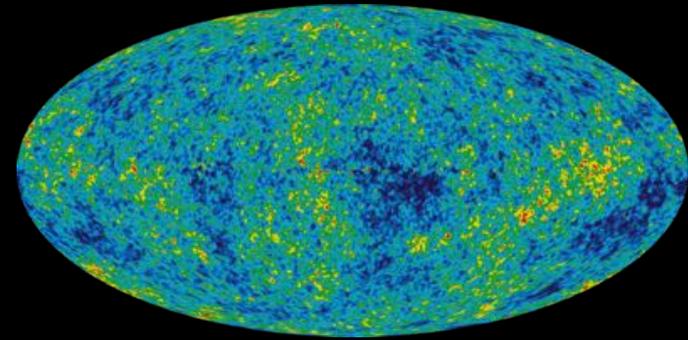


Numéro atomique

L'Univers inhomogène

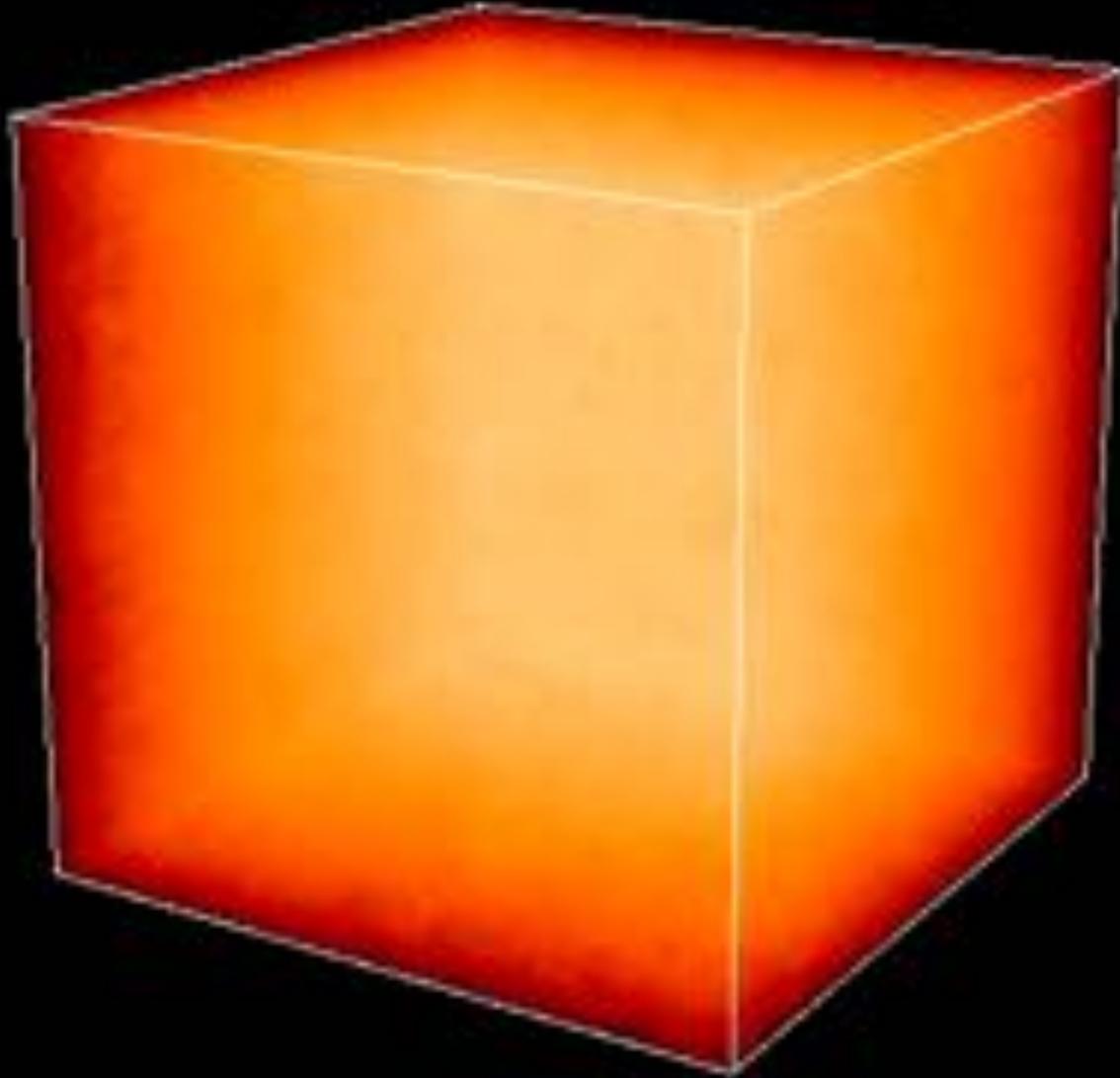
Localement, l'Univers est fortement inhomogène. Comment les structures denses se sont-elles formées ?

- 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.

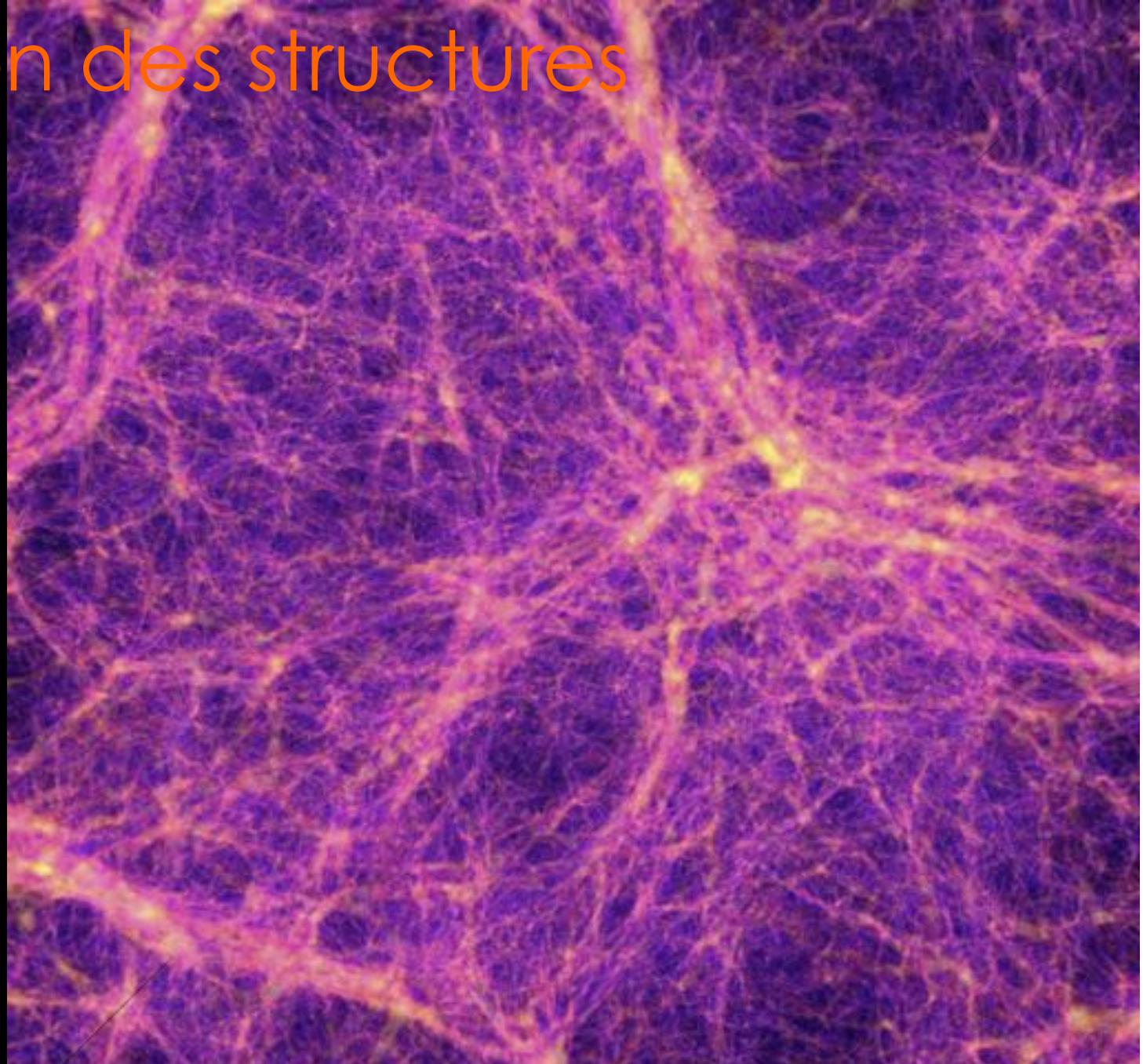


Simulation numérique (Colombi et al., IAP) - <http://www.projet-horizon.fr/>

Formation des structures

La matière noire
à $t \sim 2.7$ Gyr.

La couleur code
la densité de
matière noire

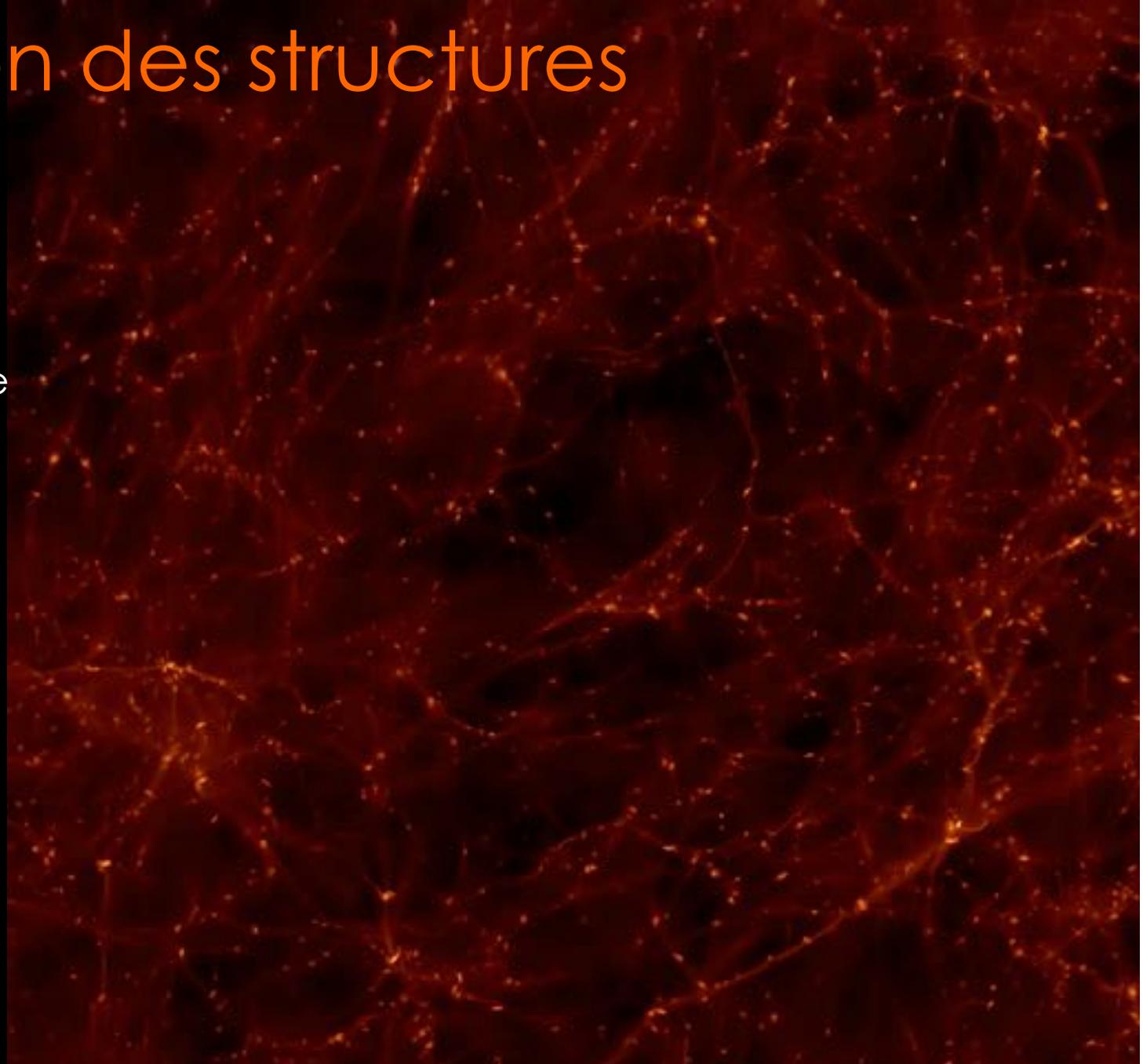


Simulation « Mare Nostrum » (Pichon et al., IAP) - <http://www.projet-horizon.fr/>

Formation des structures

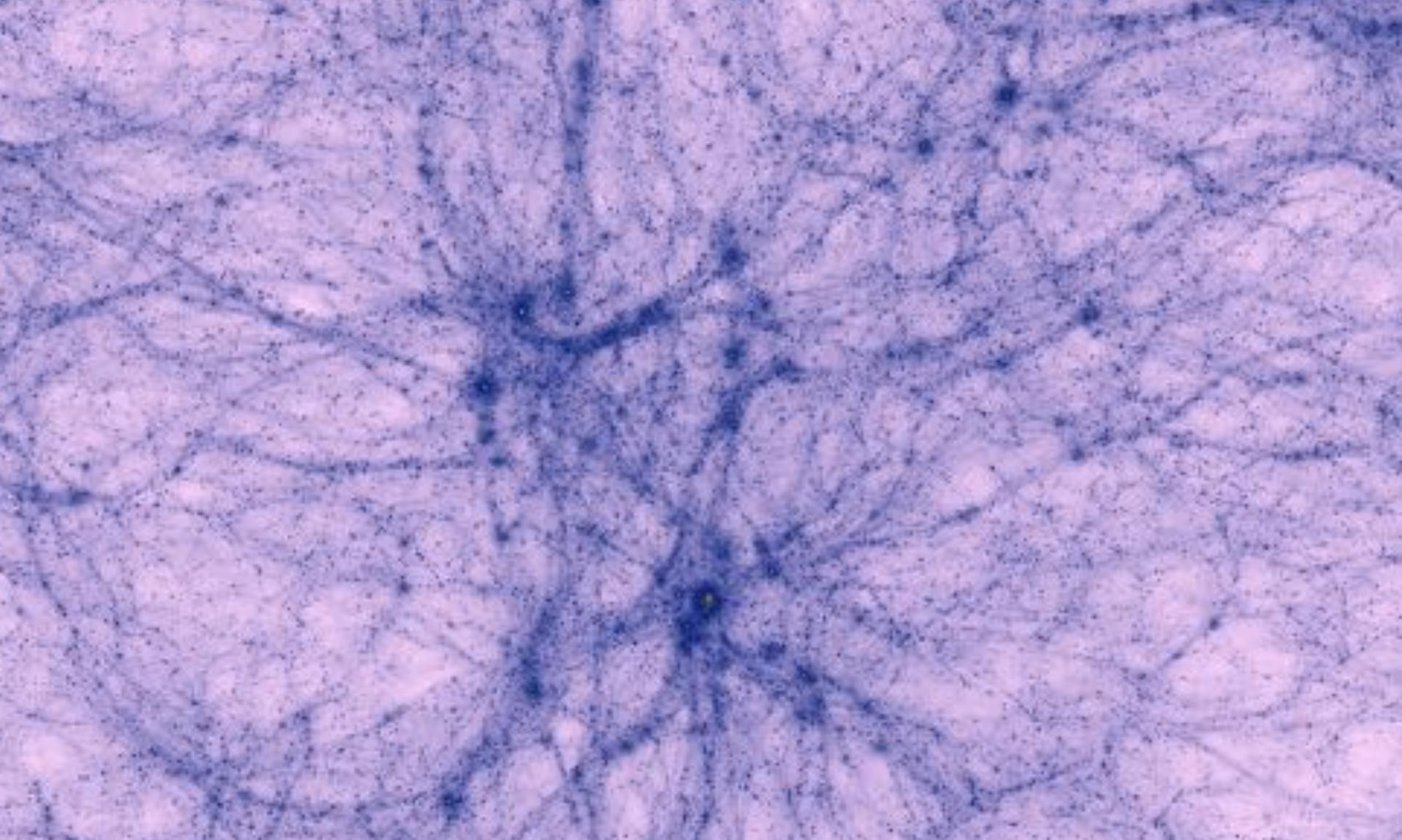
La matière
baryonique
à $t \sim 2.7$ Gyr.

La couleur code
la densité de
matière baryonique



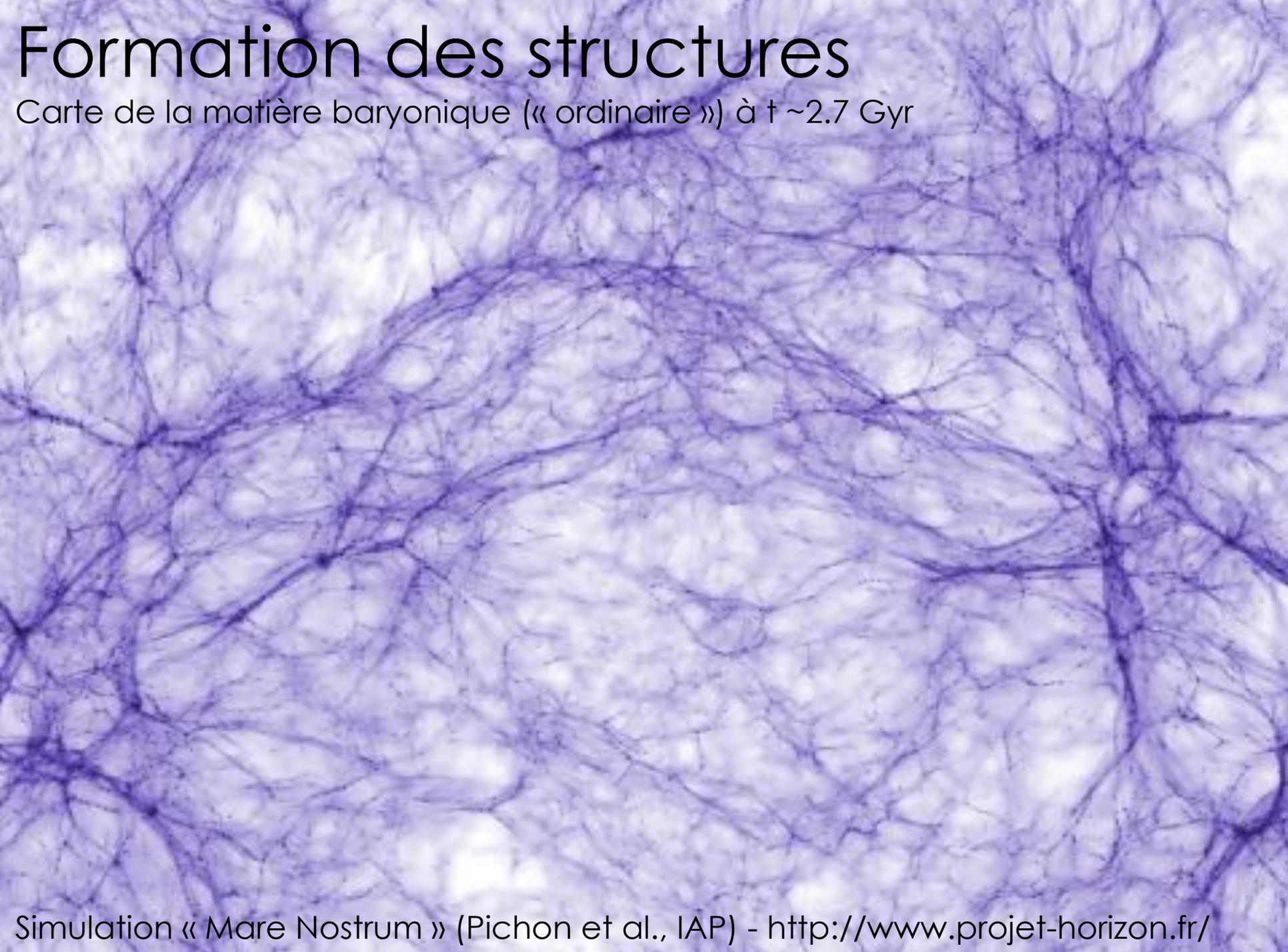
Formation des structures

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 :

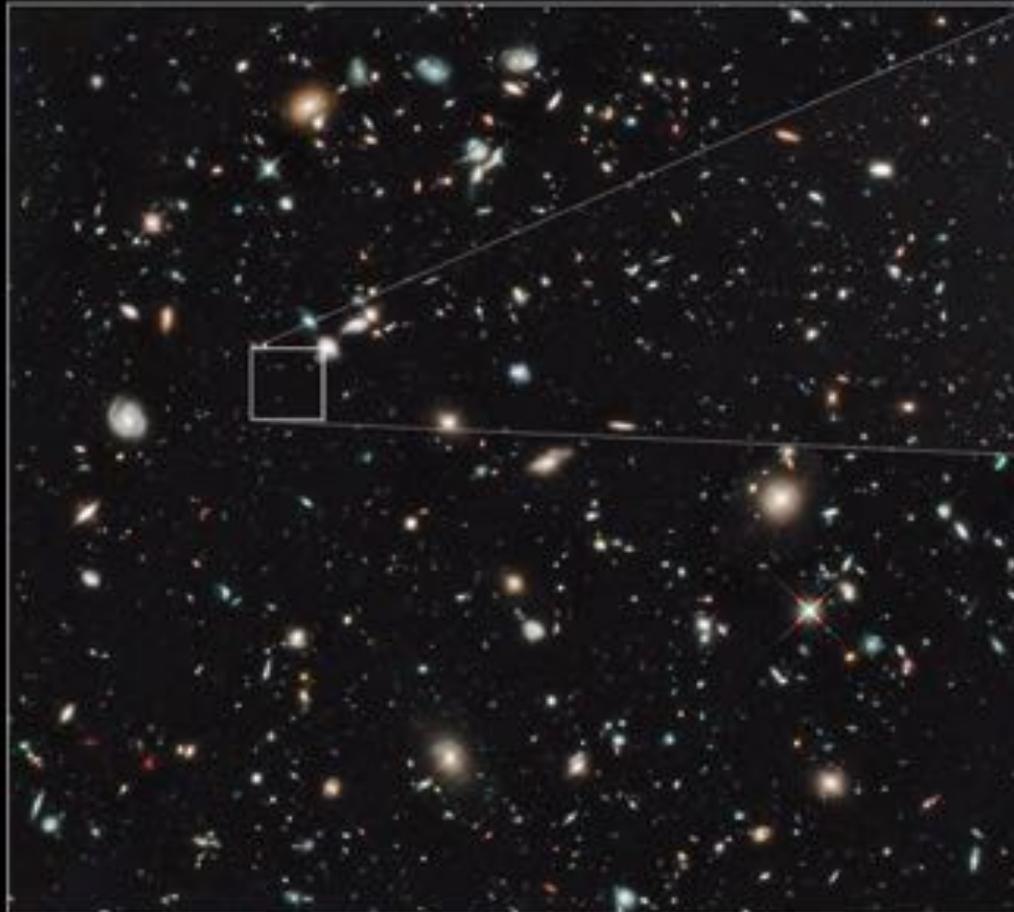


Formation des galaxies

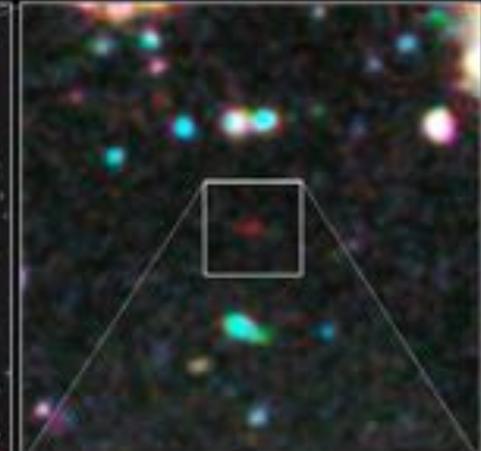
Lorsque des structures de matière noire se forment par effondrement gravitationnel, au sommet de l'iceberg apparaissent les galaxies.

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

Hubble Ultra Deep Field 2009-2010



Hubble Space Telescope • WFC3/IR



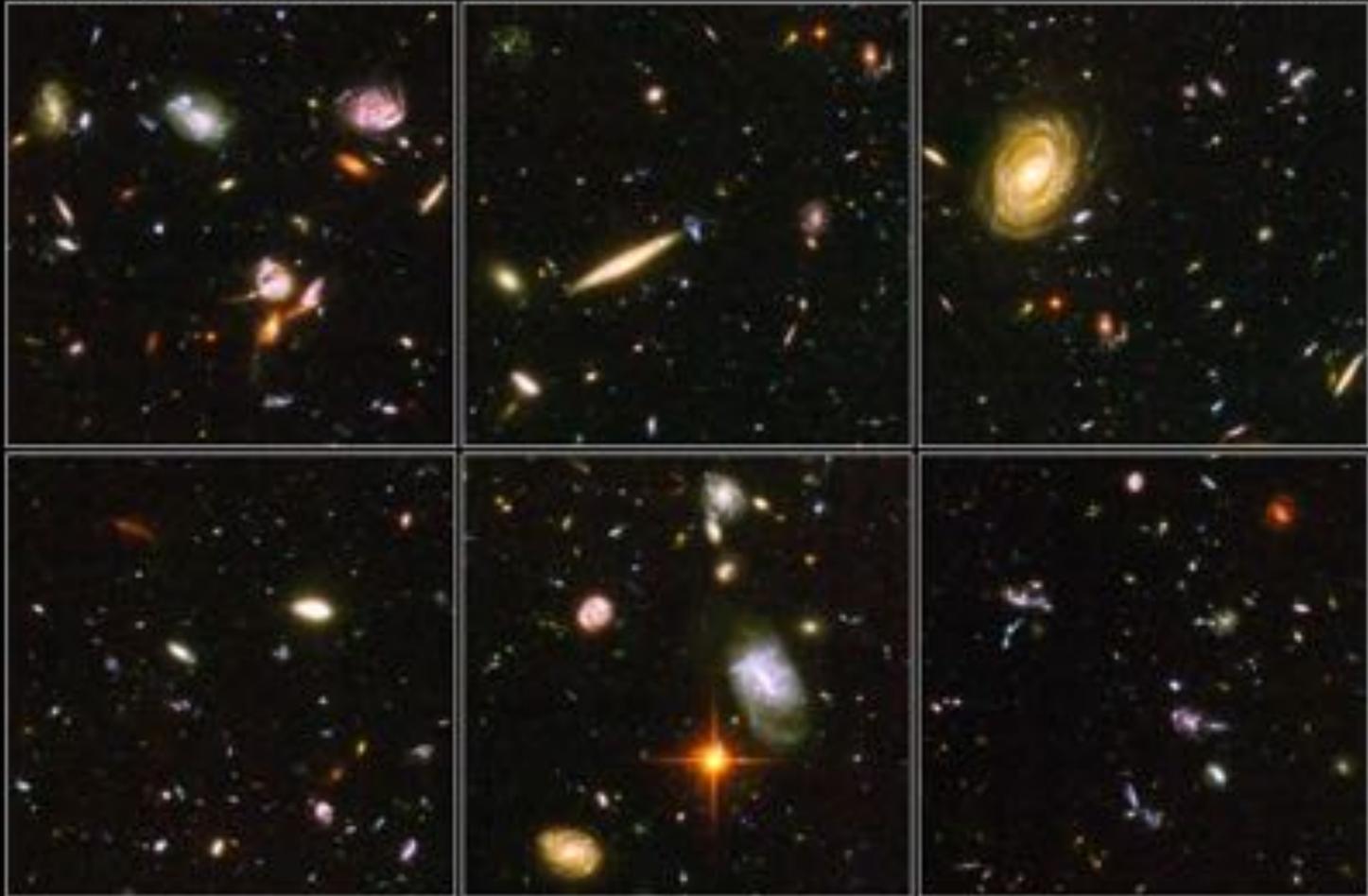
Formation des galaxies

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

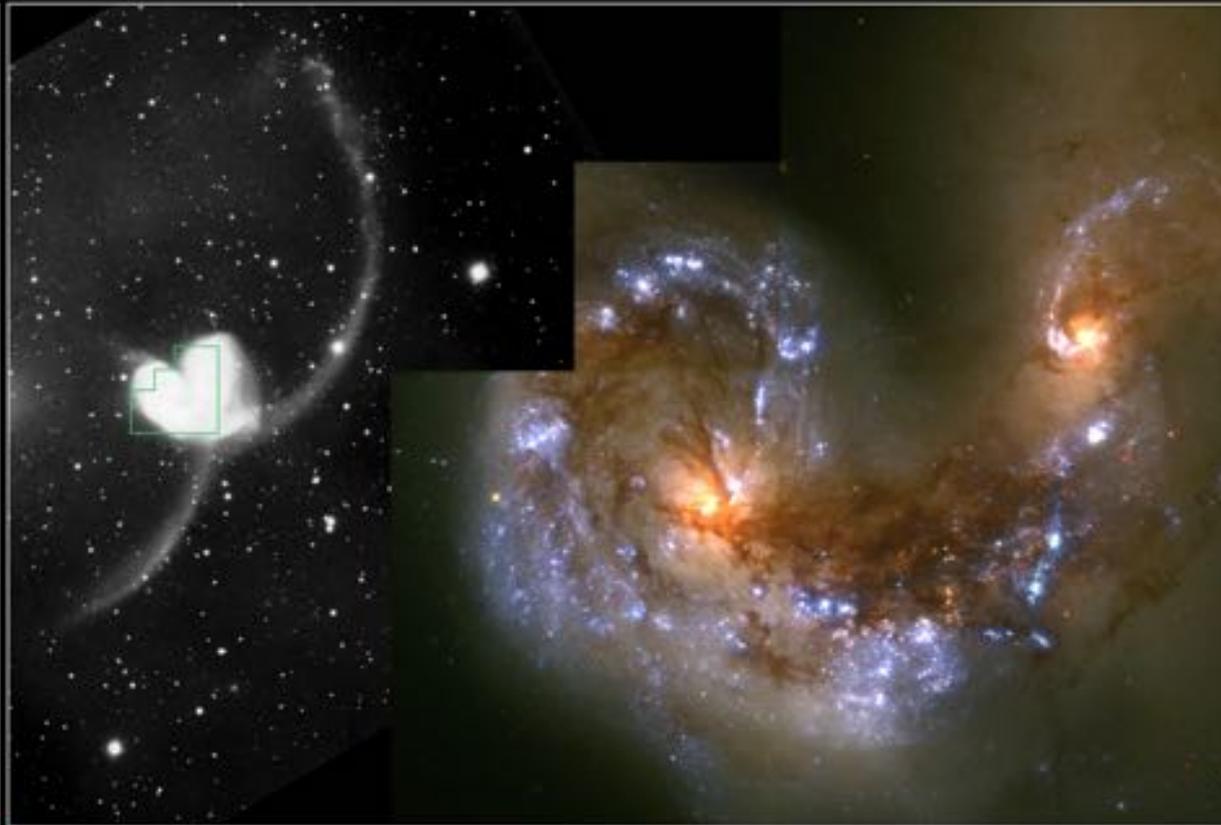
HST • ACS



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

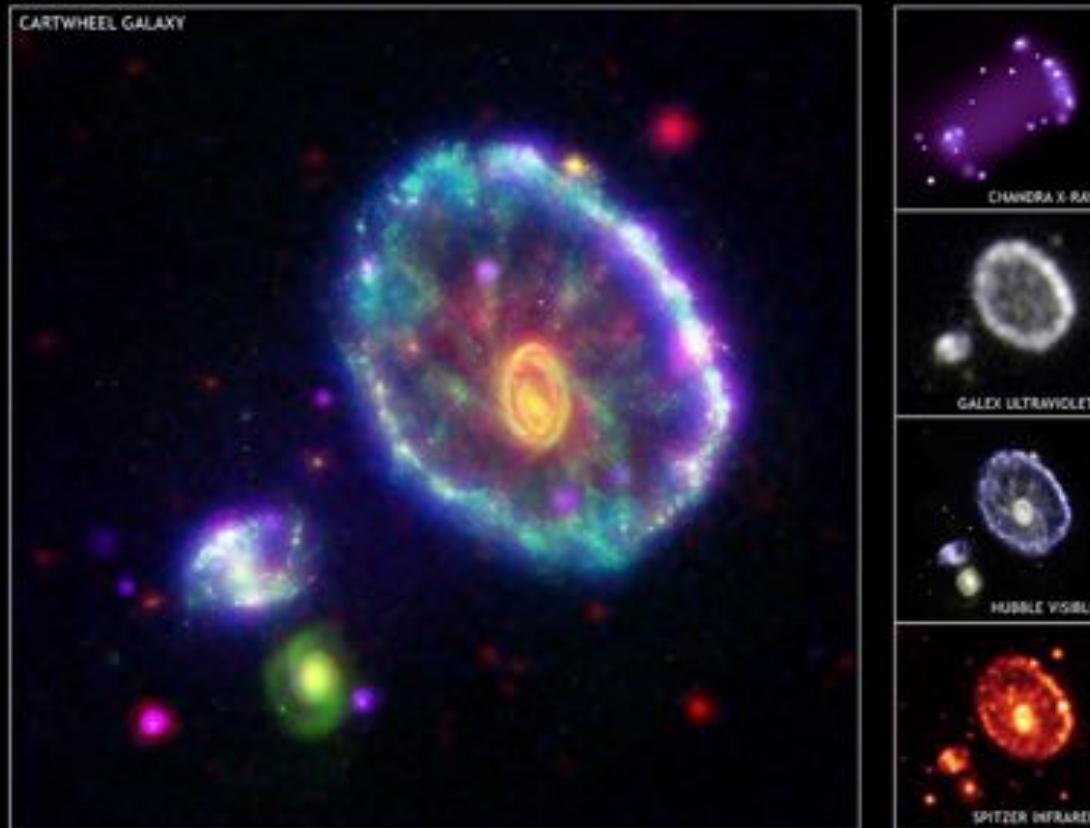


Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

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 (A85)

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)

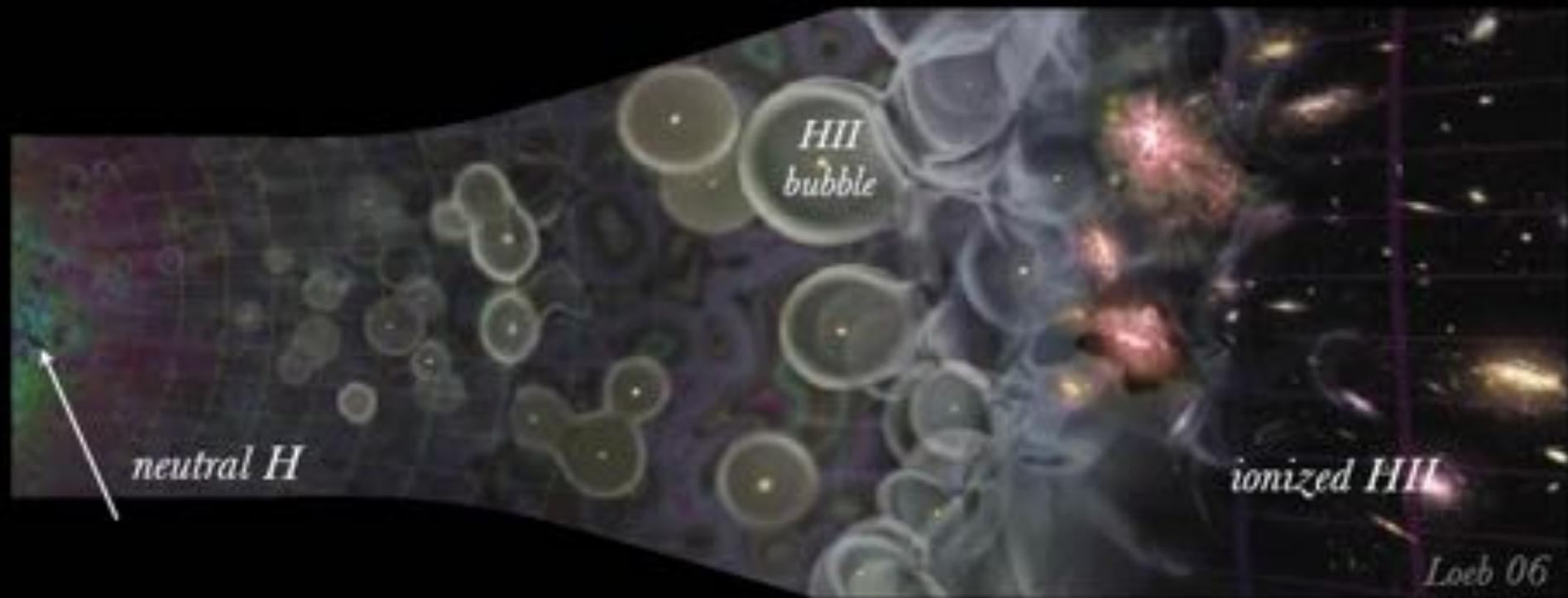


NGC 1232 (VLT)

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.



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 ?

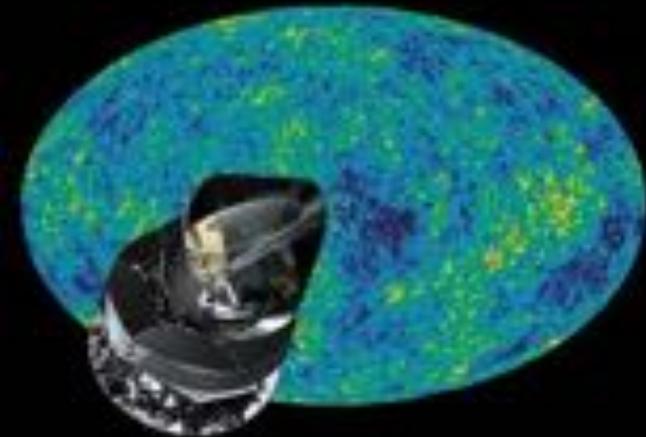
Une piste théorique intéressante pour résoudre plusieurs de ces problèmes : une phase initiale d'inflation vers $t \sim 10^{-34}$ s.

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.

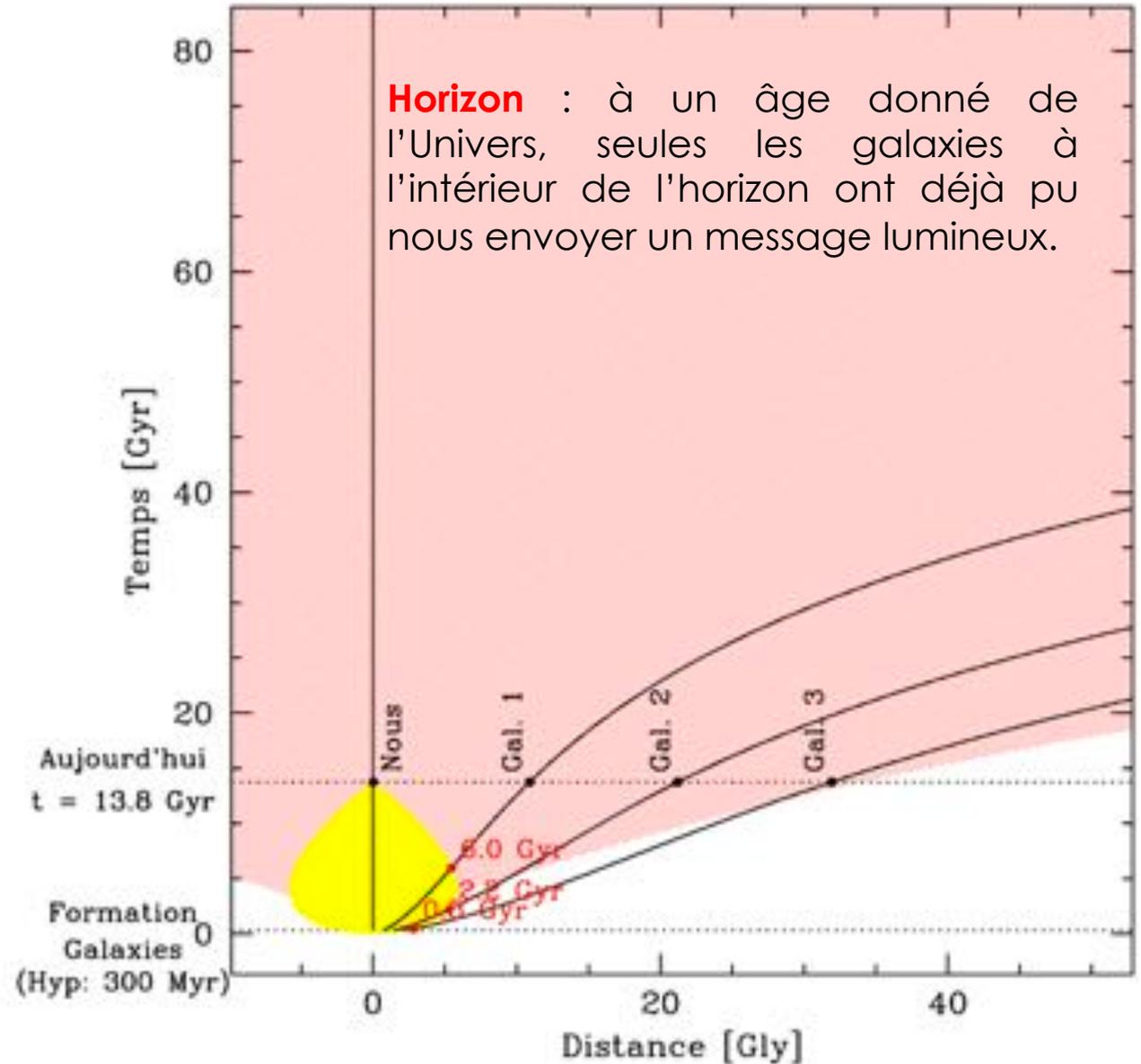


A plus long terme, on peut aussi espérer :

- 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

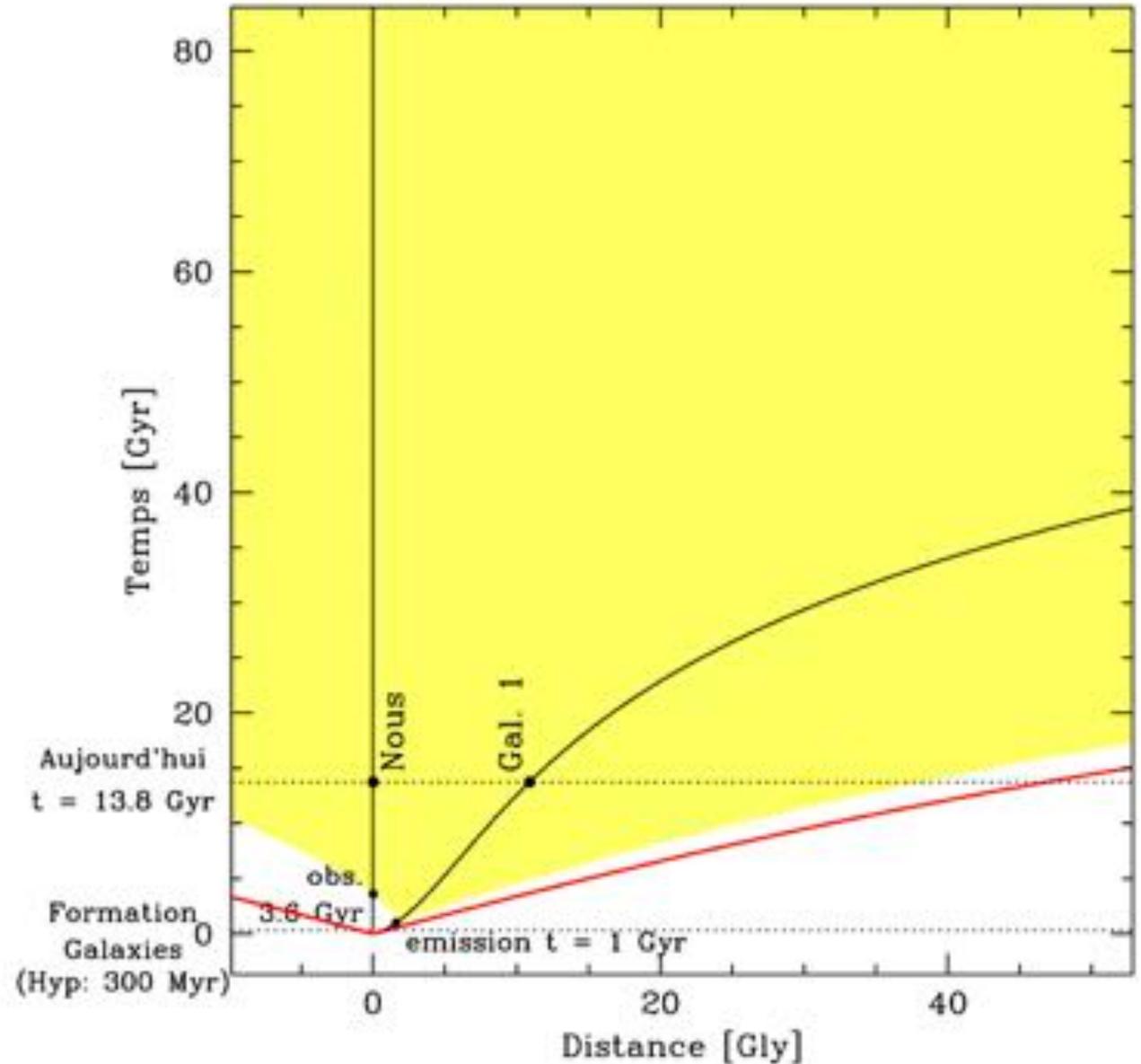
L'accélération de l'expansion, si elle se confirme sur le long terme, a des conséquences étonnantes...



L'Univers dans le futur

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

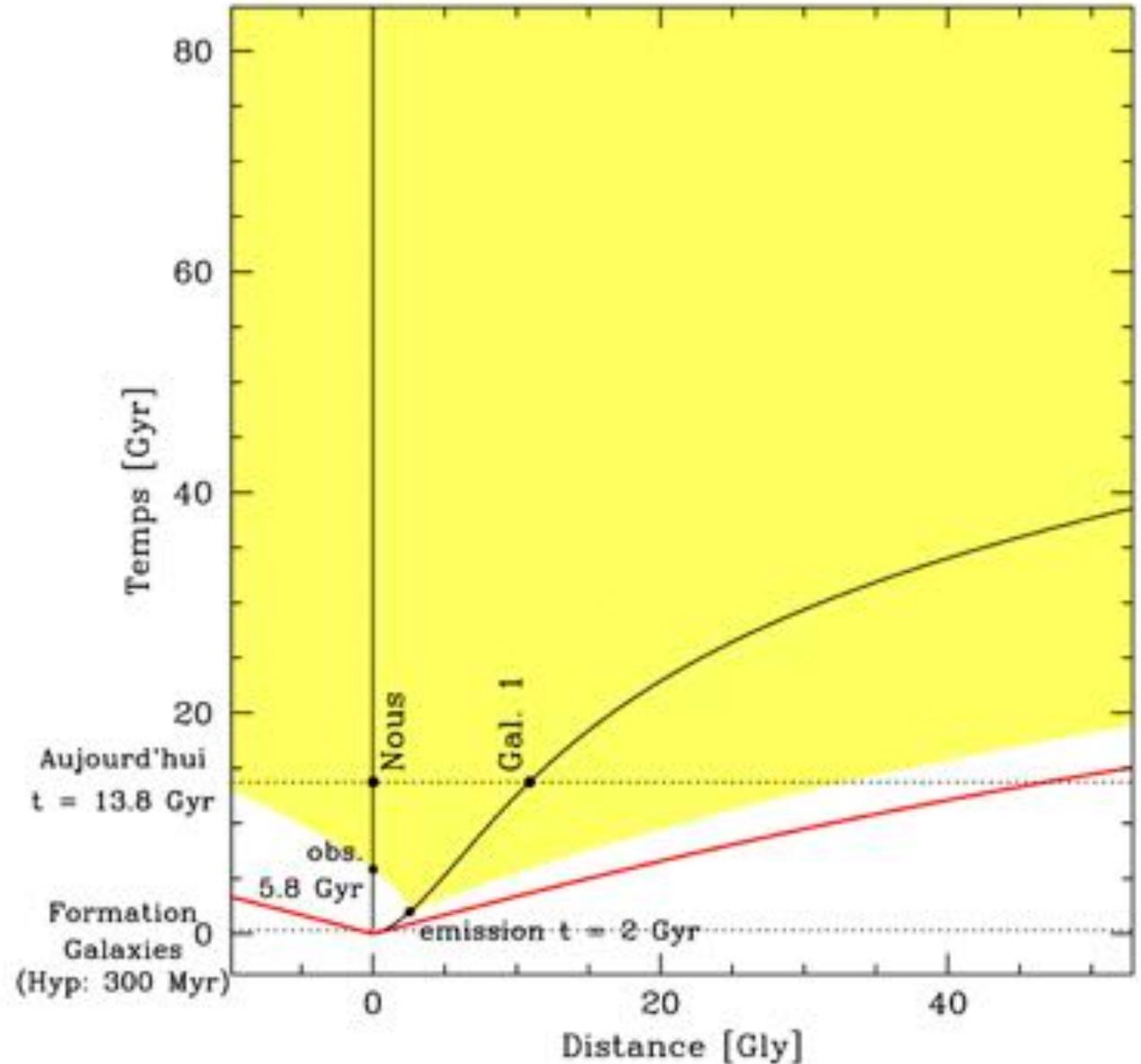
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

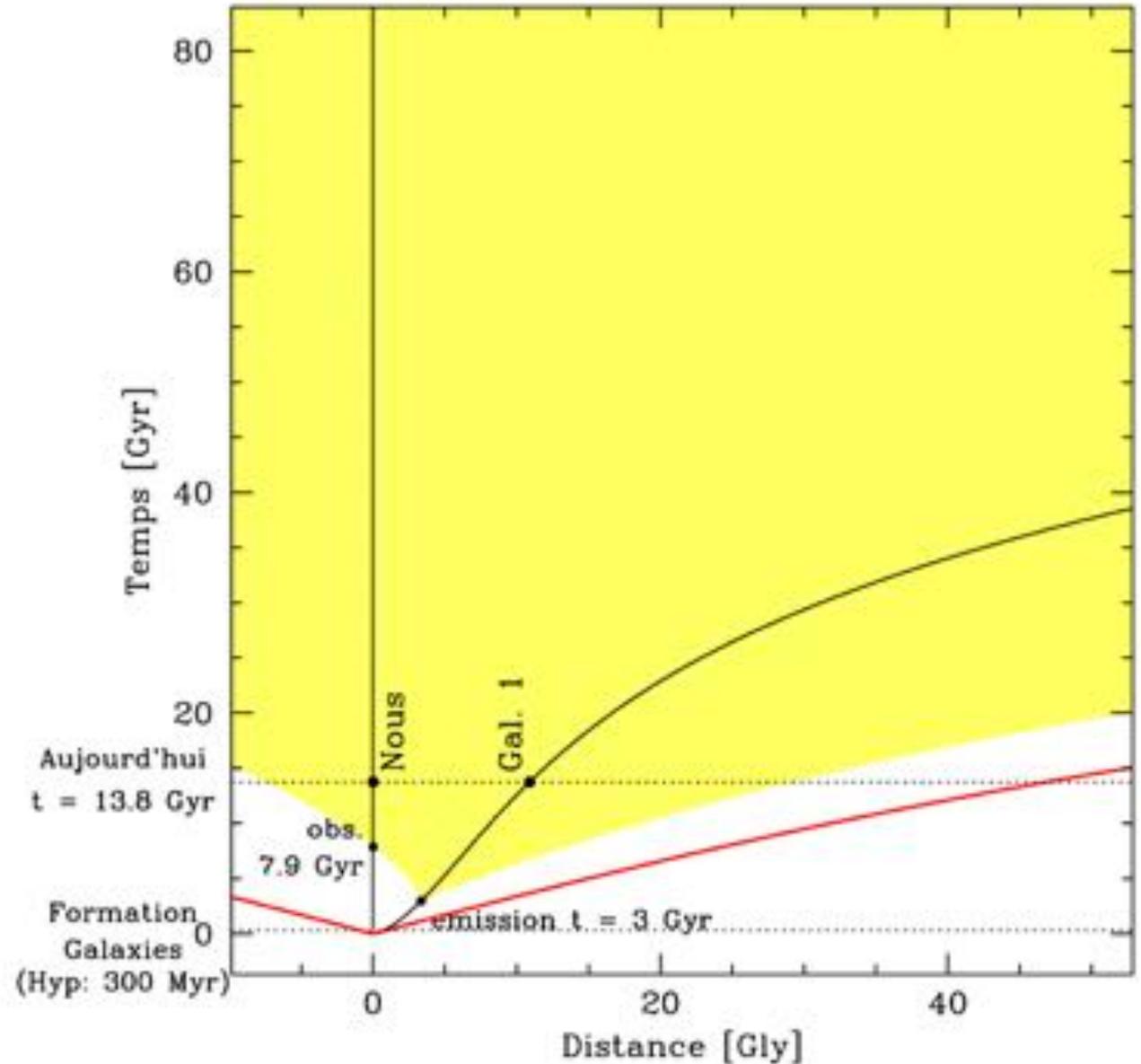
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

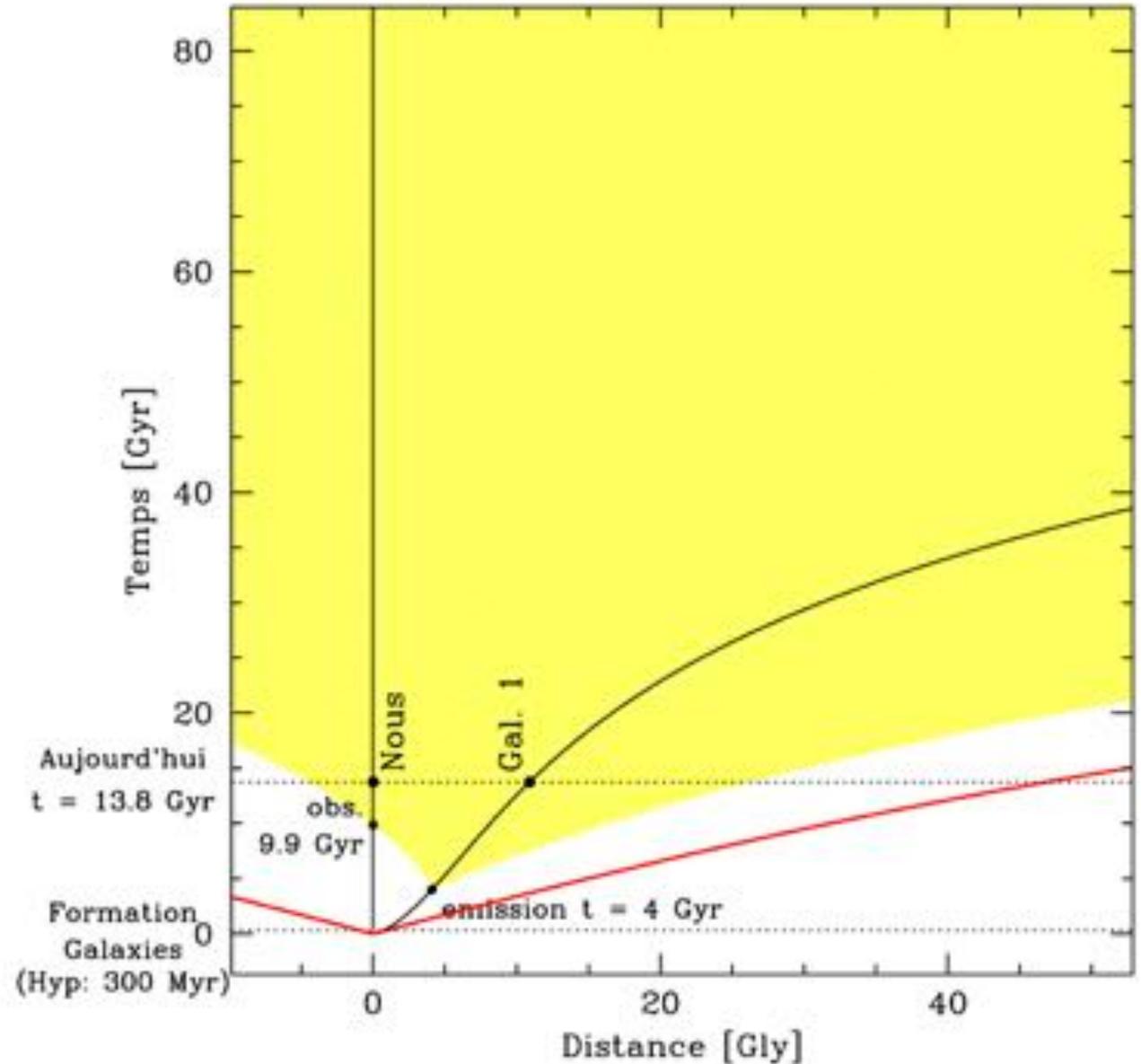
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

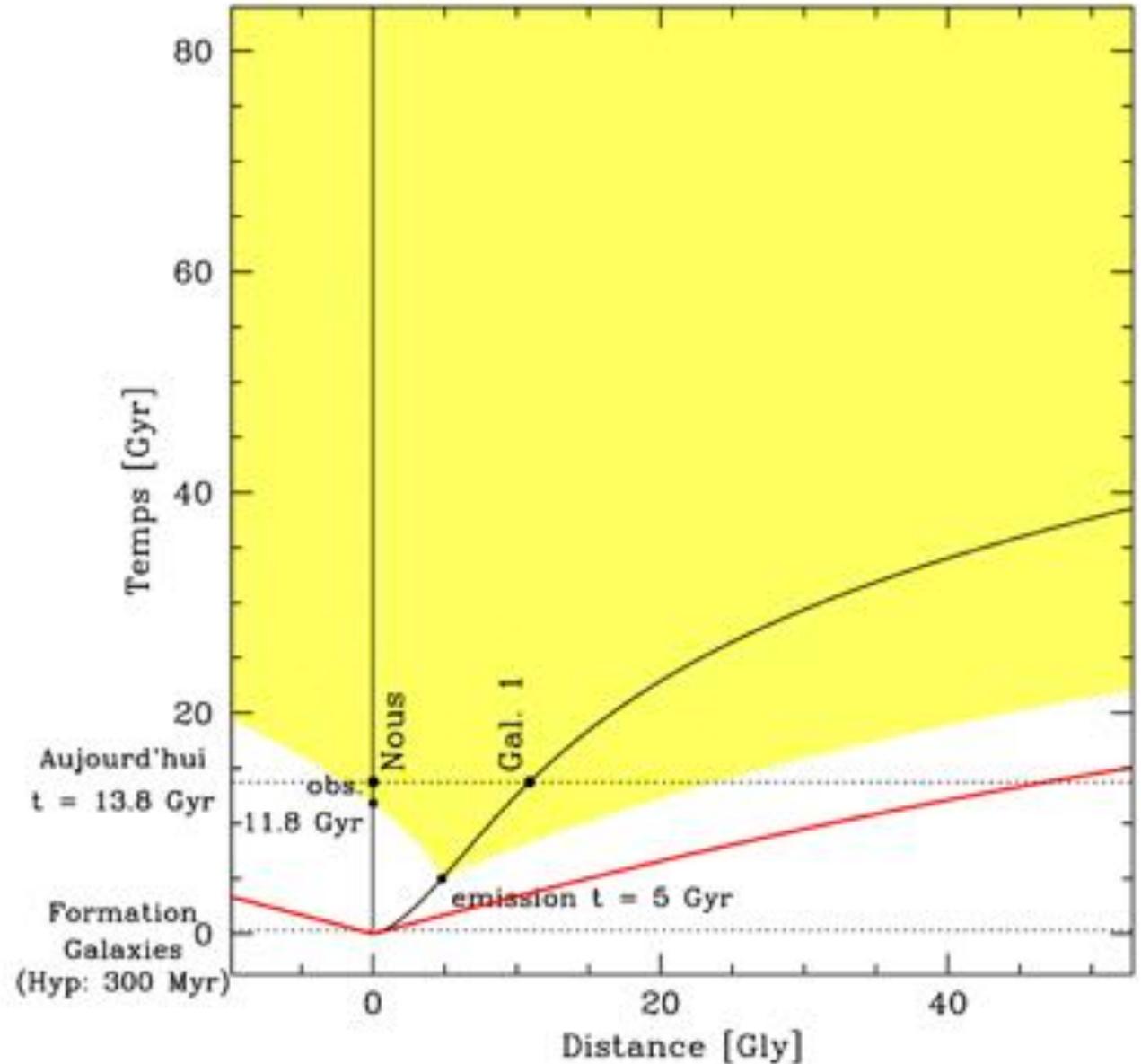
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

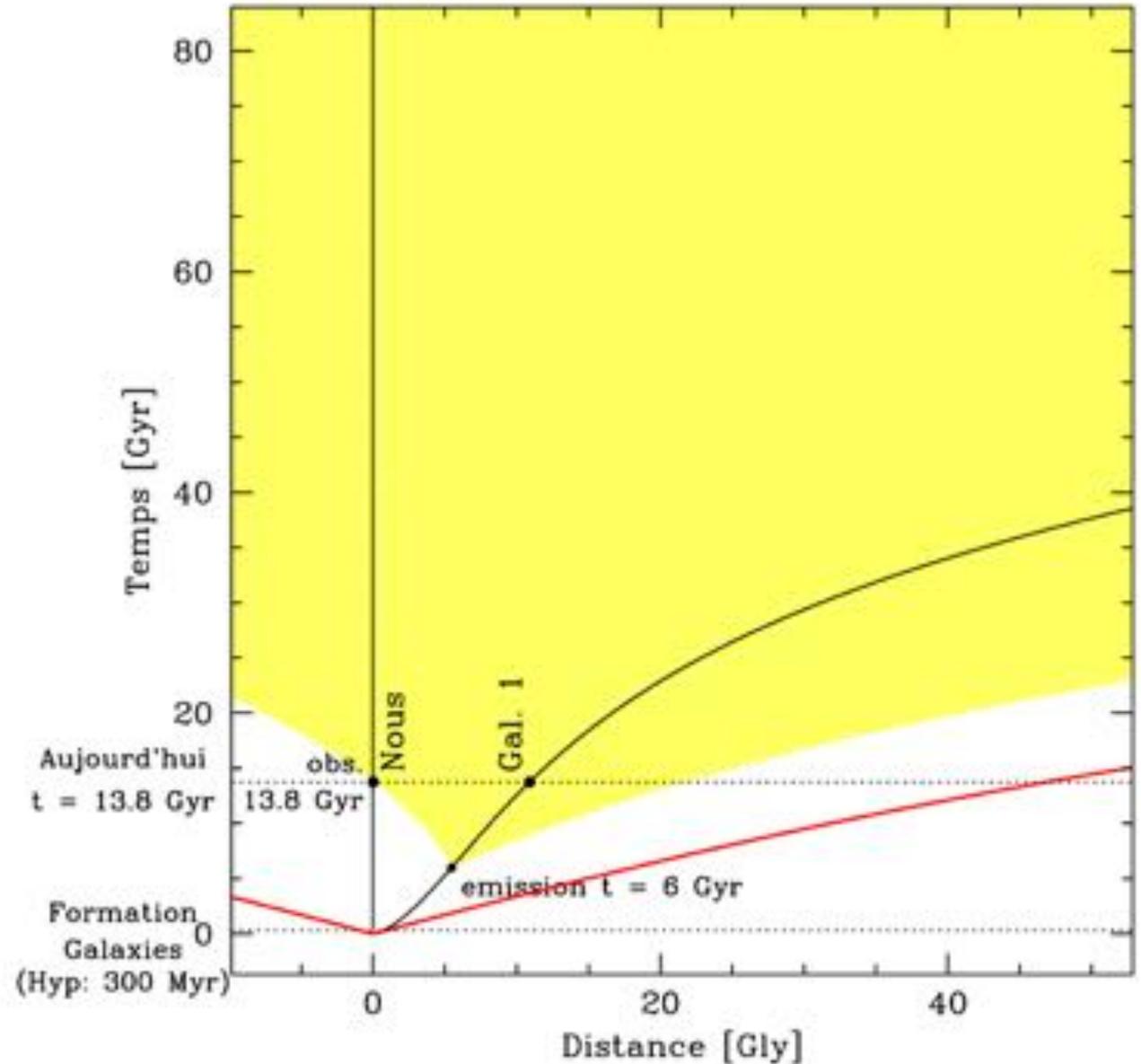
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

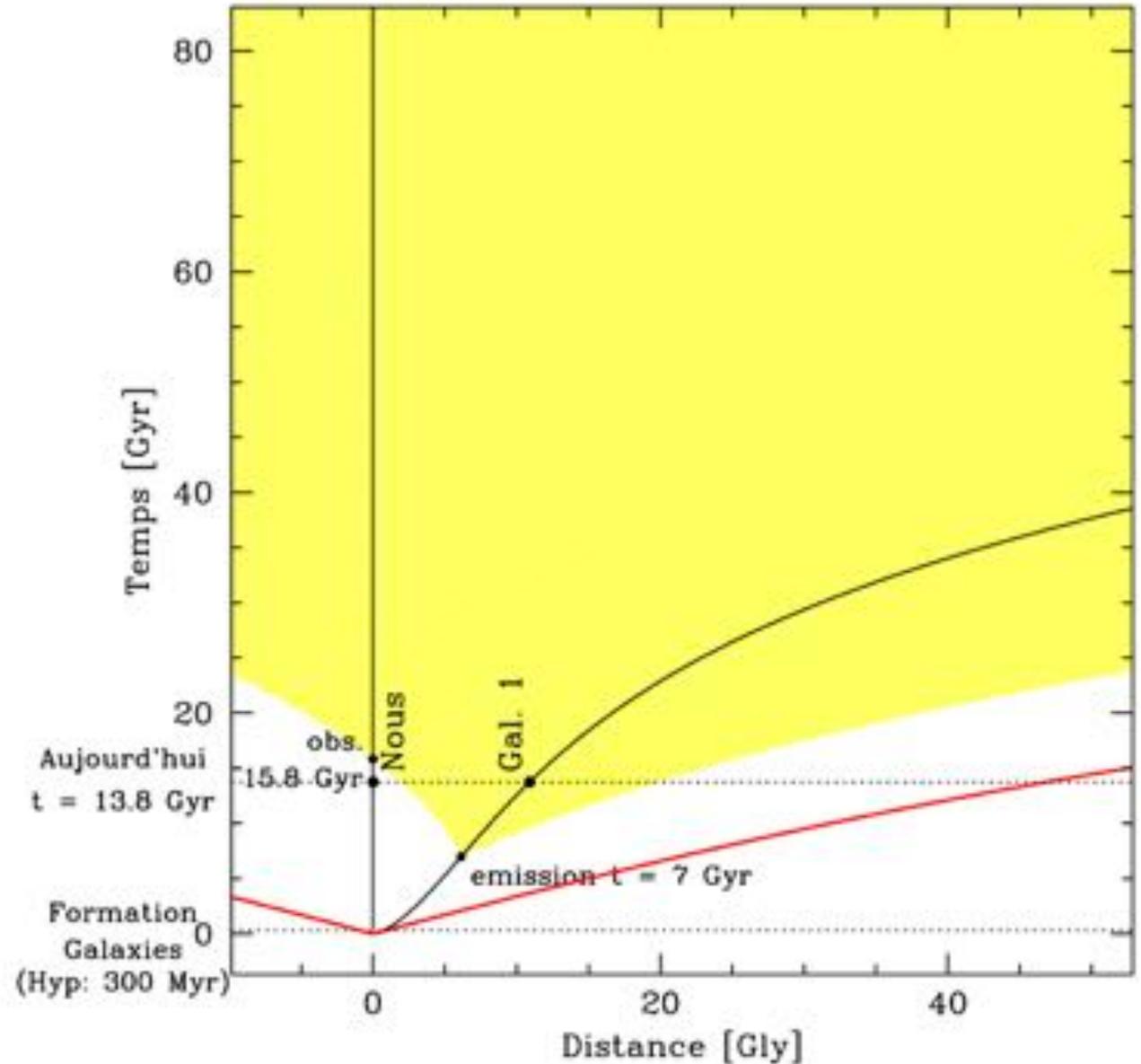
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

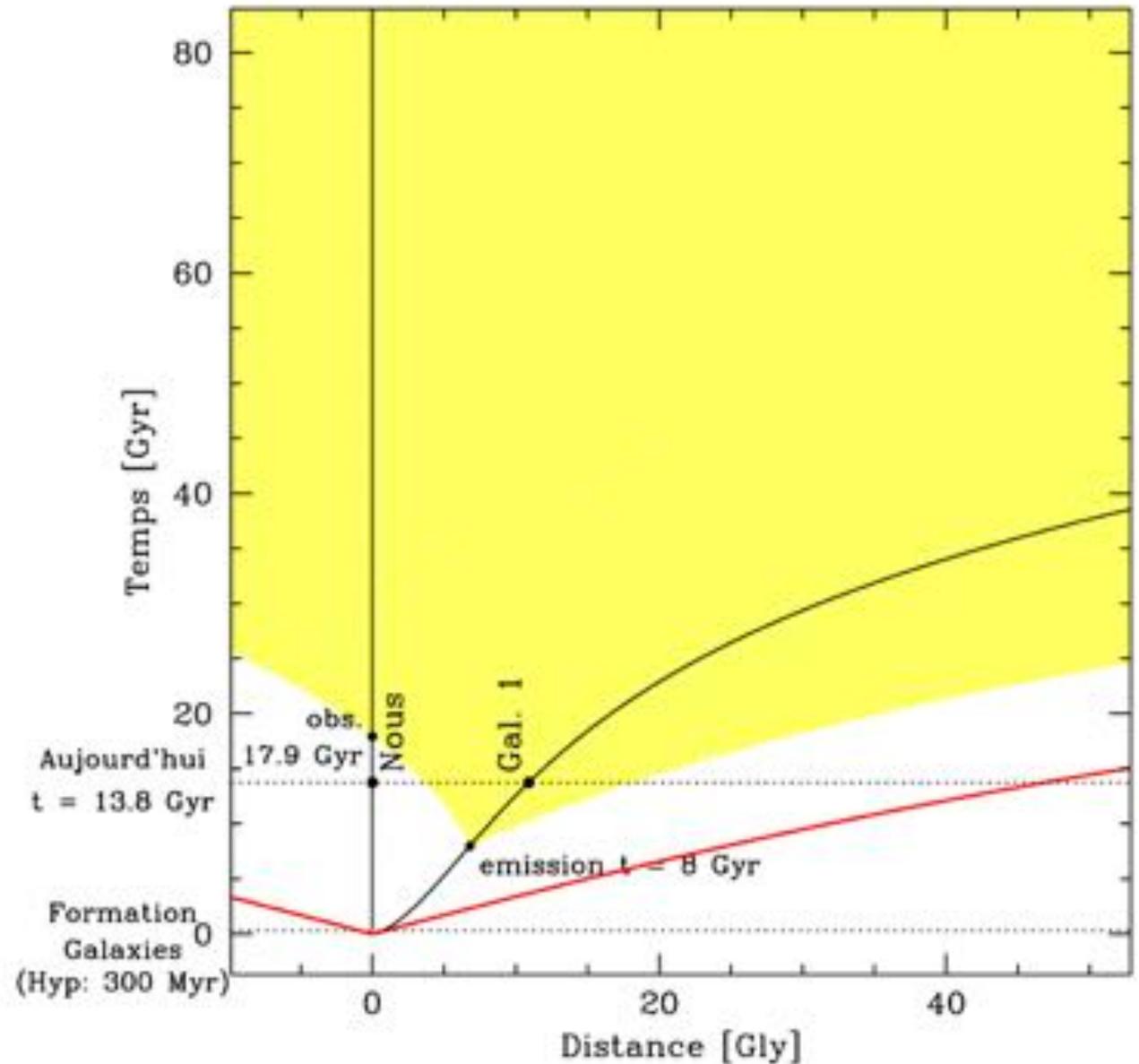
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

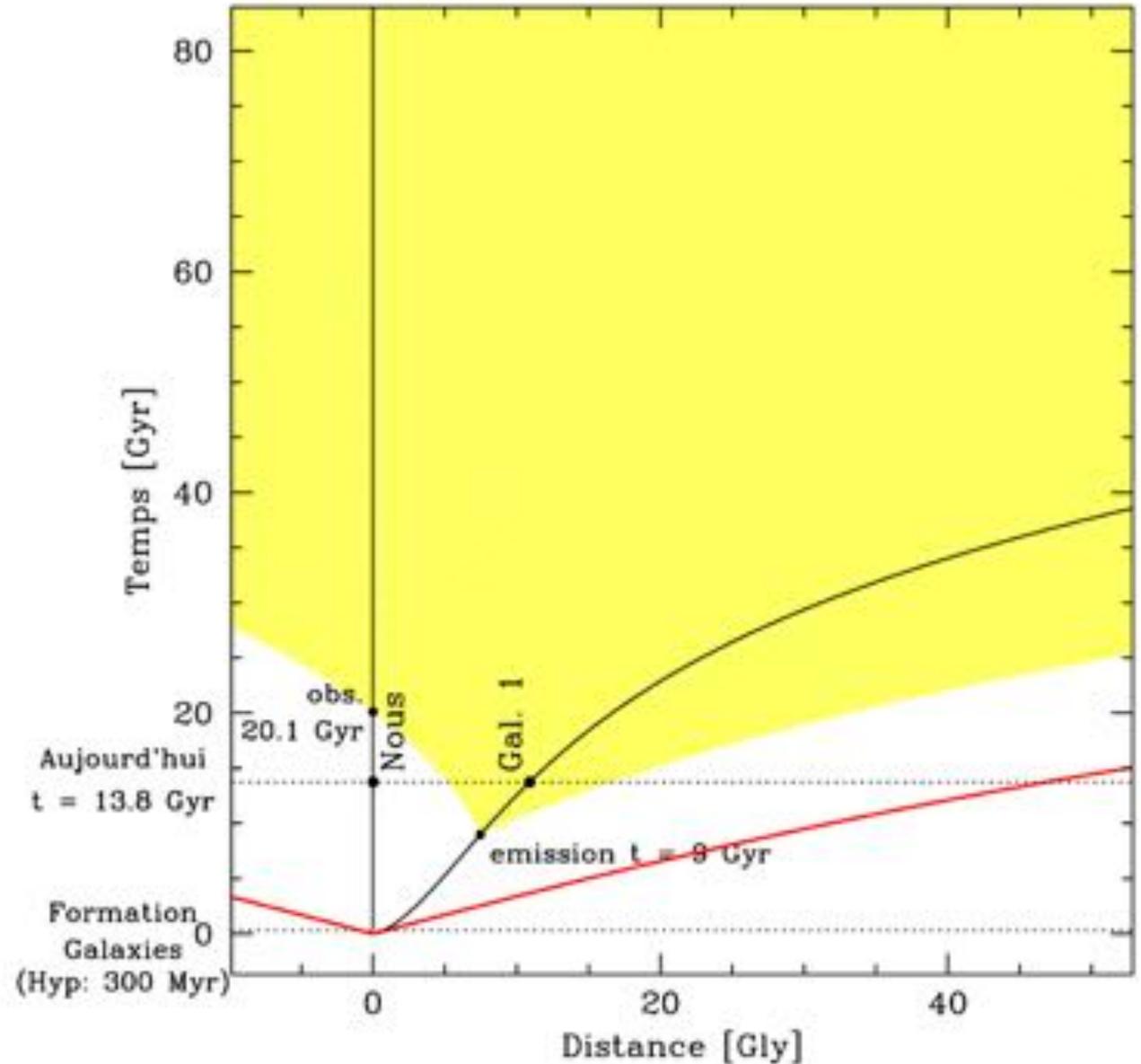
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

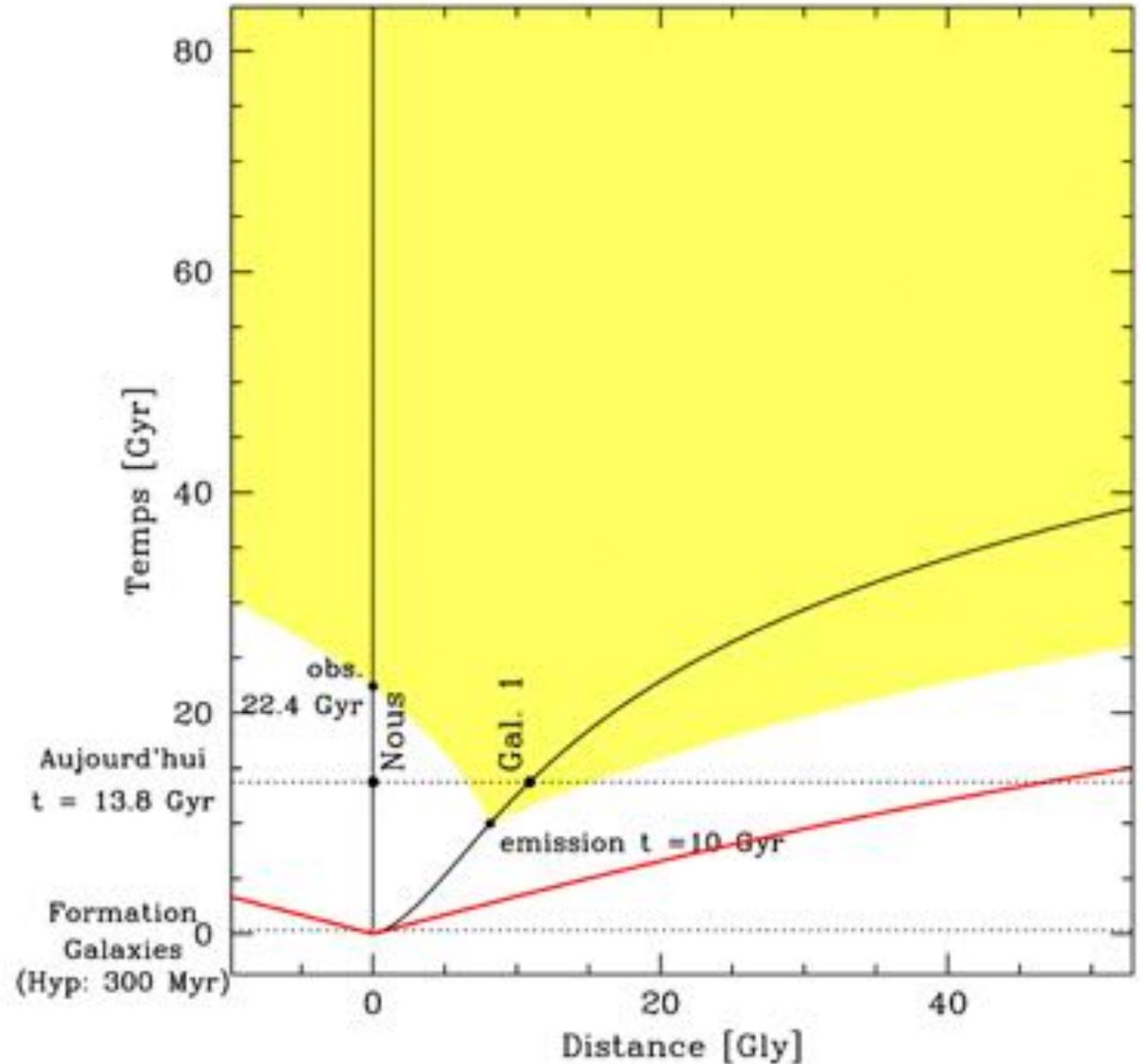
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

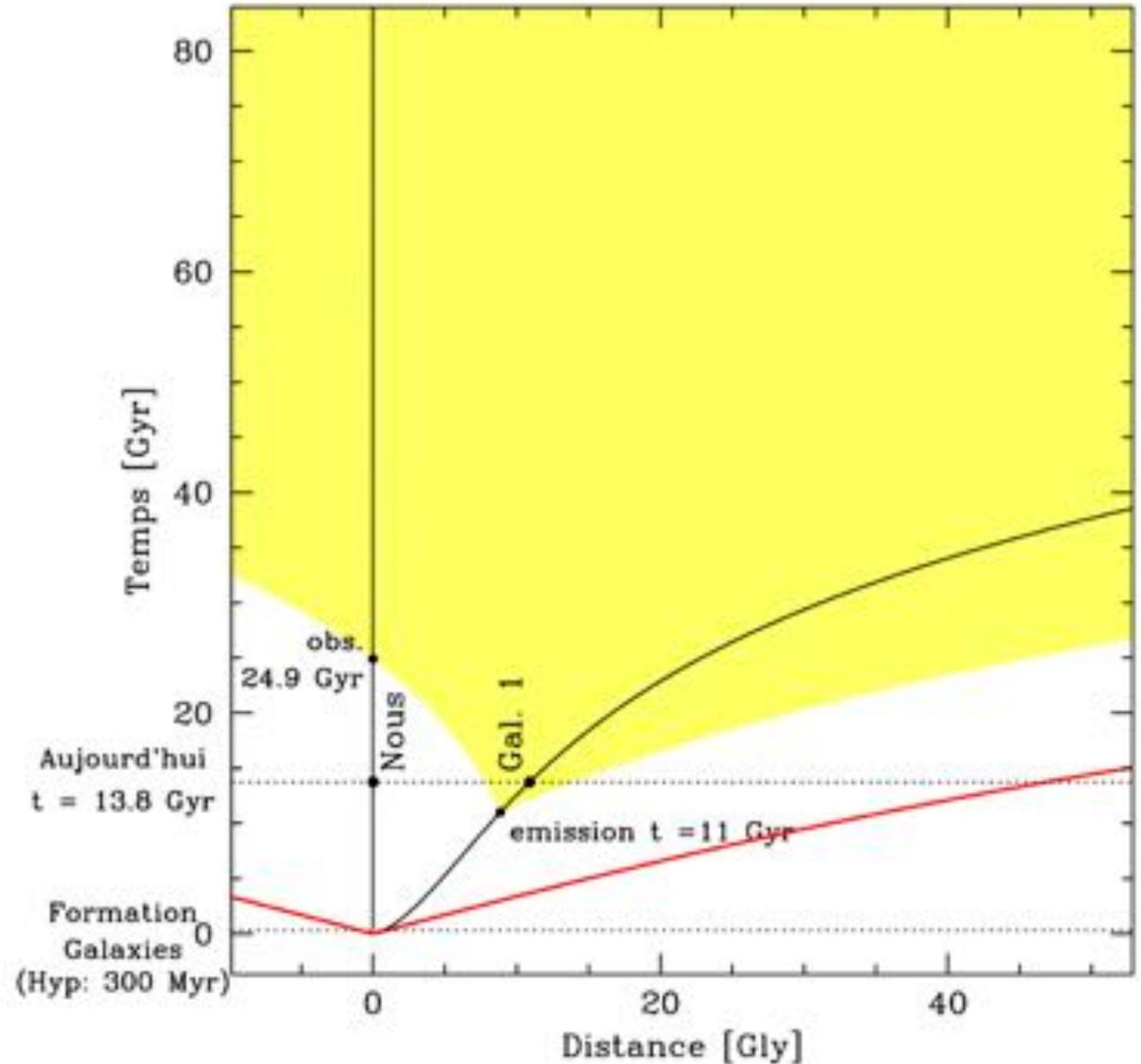
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

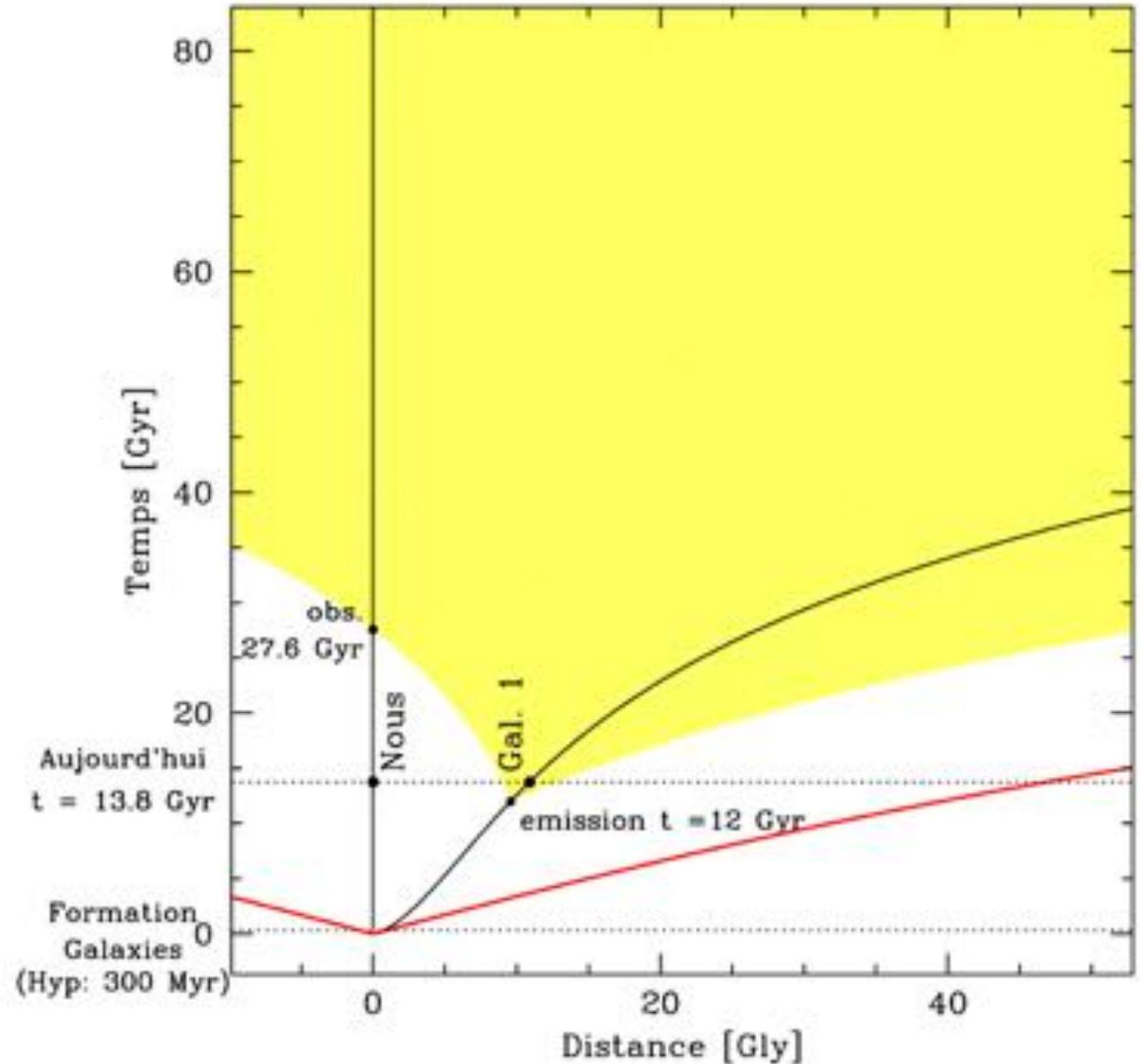
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

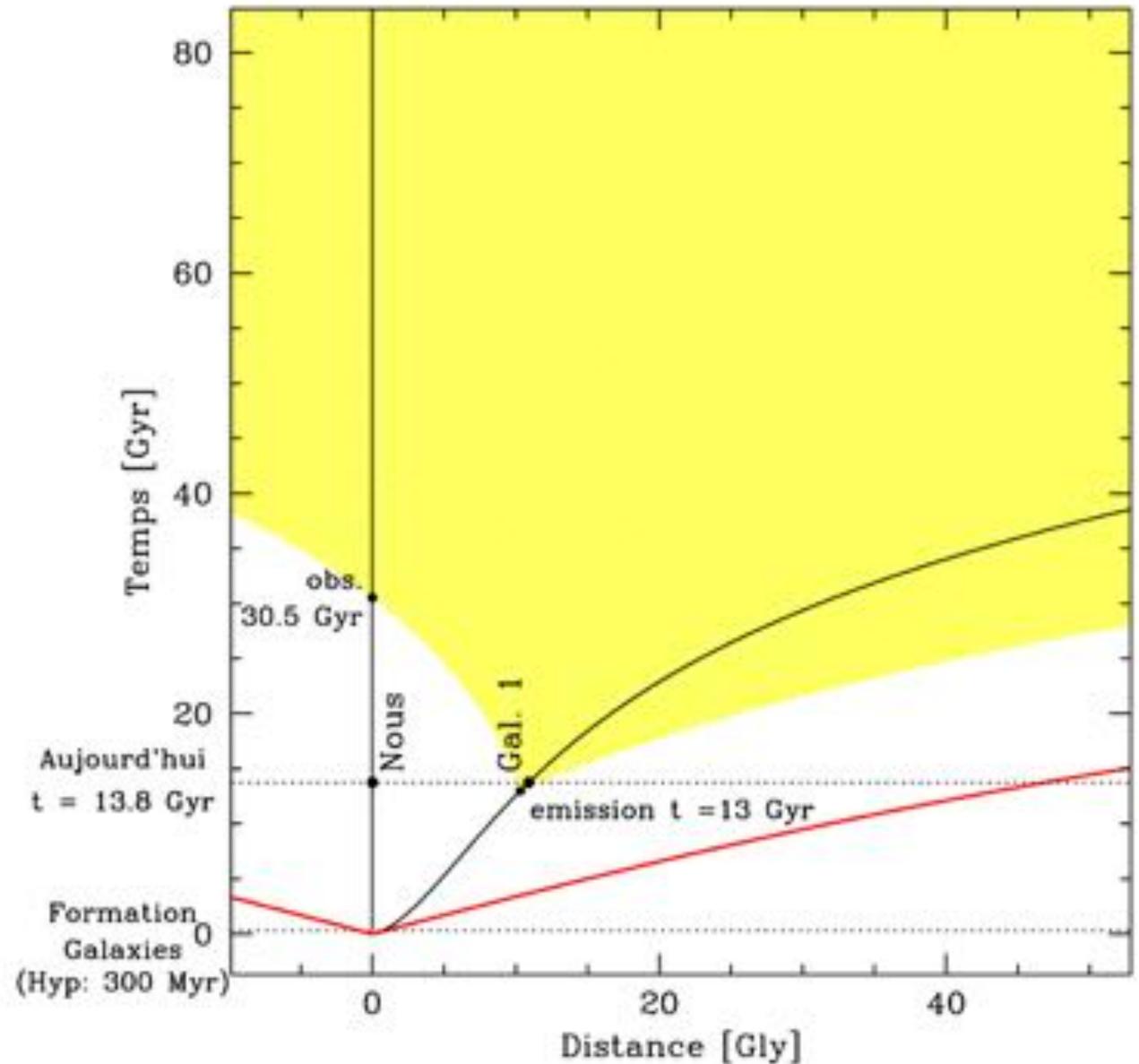
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

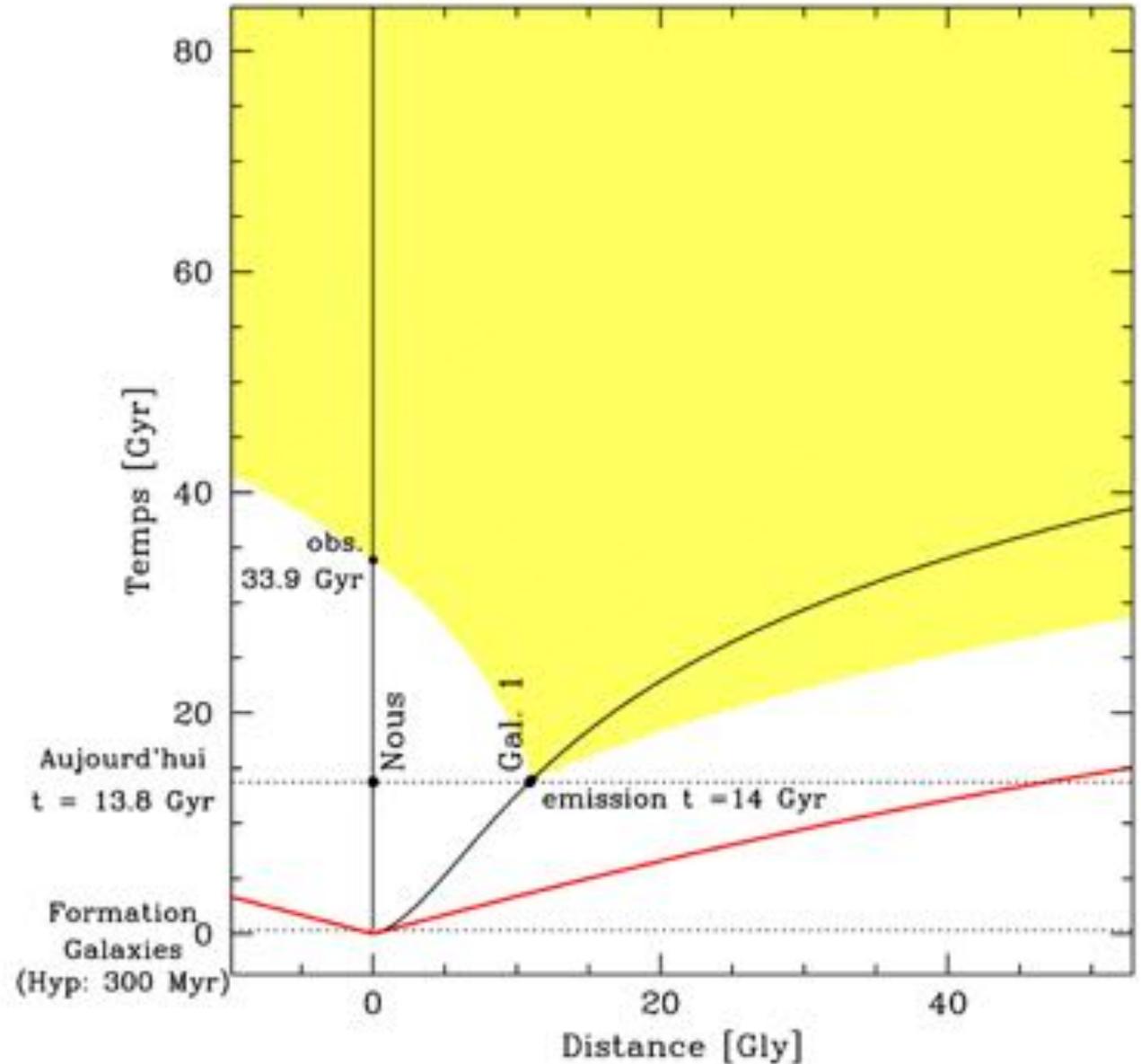
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

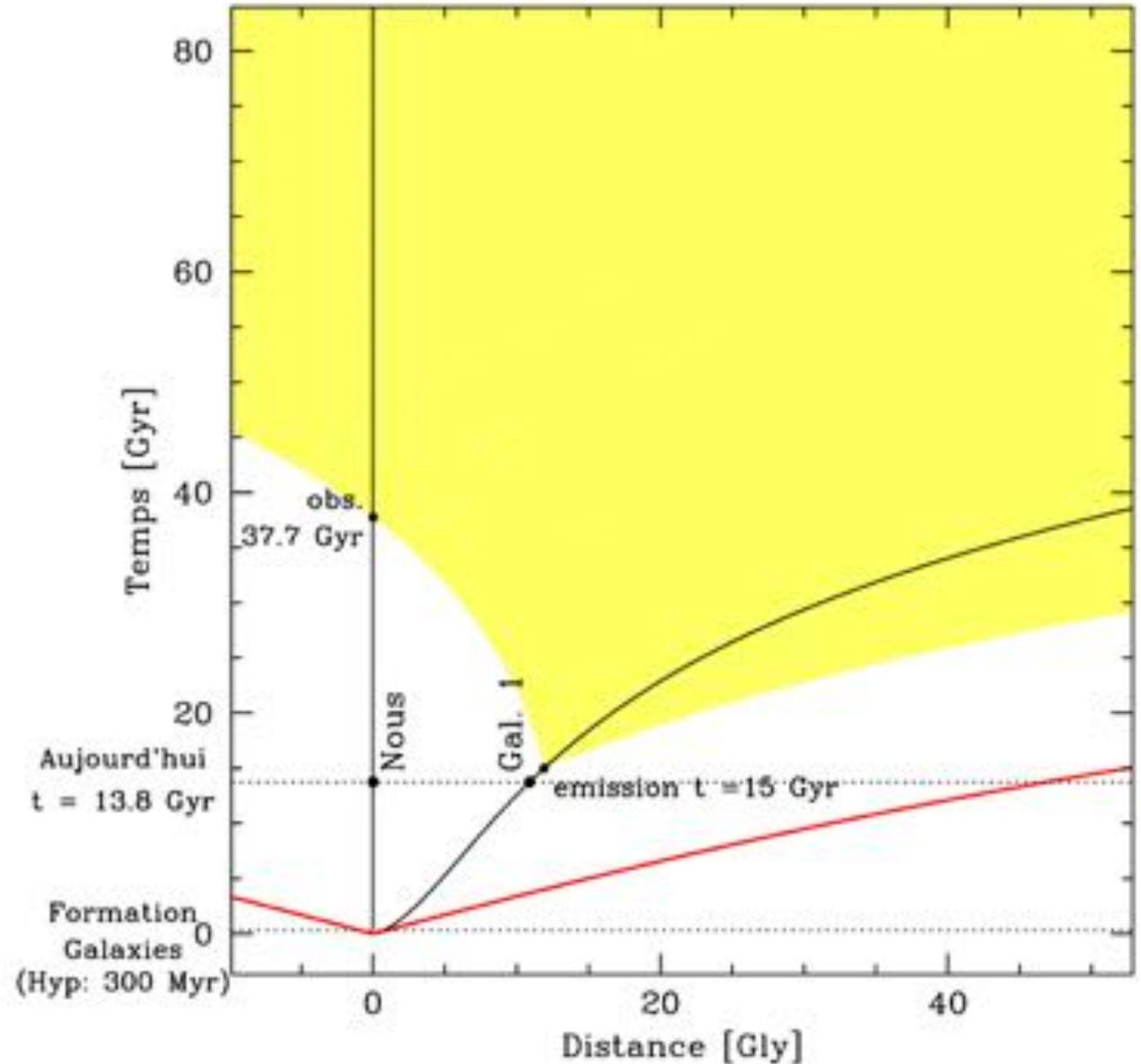
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

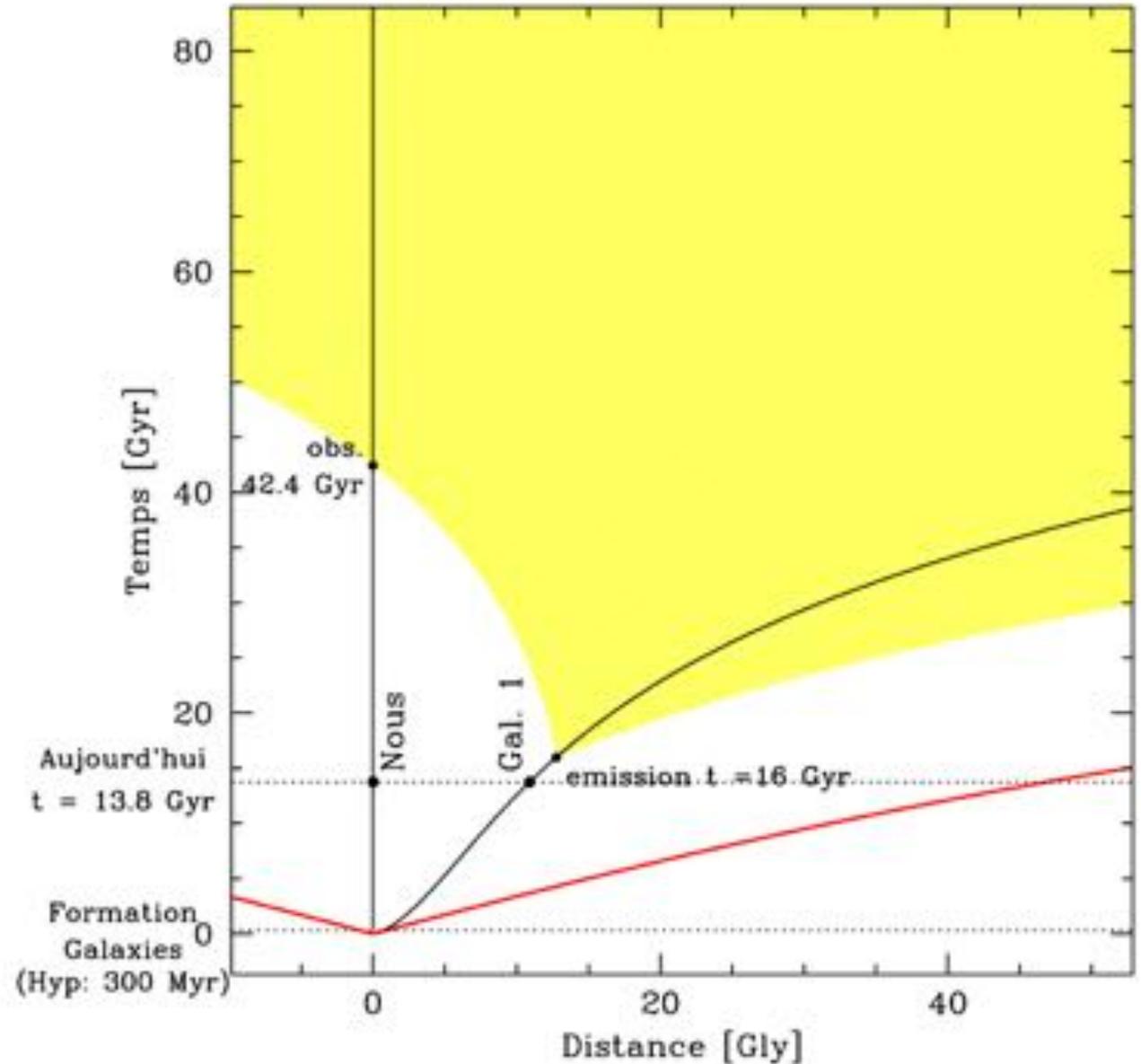
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

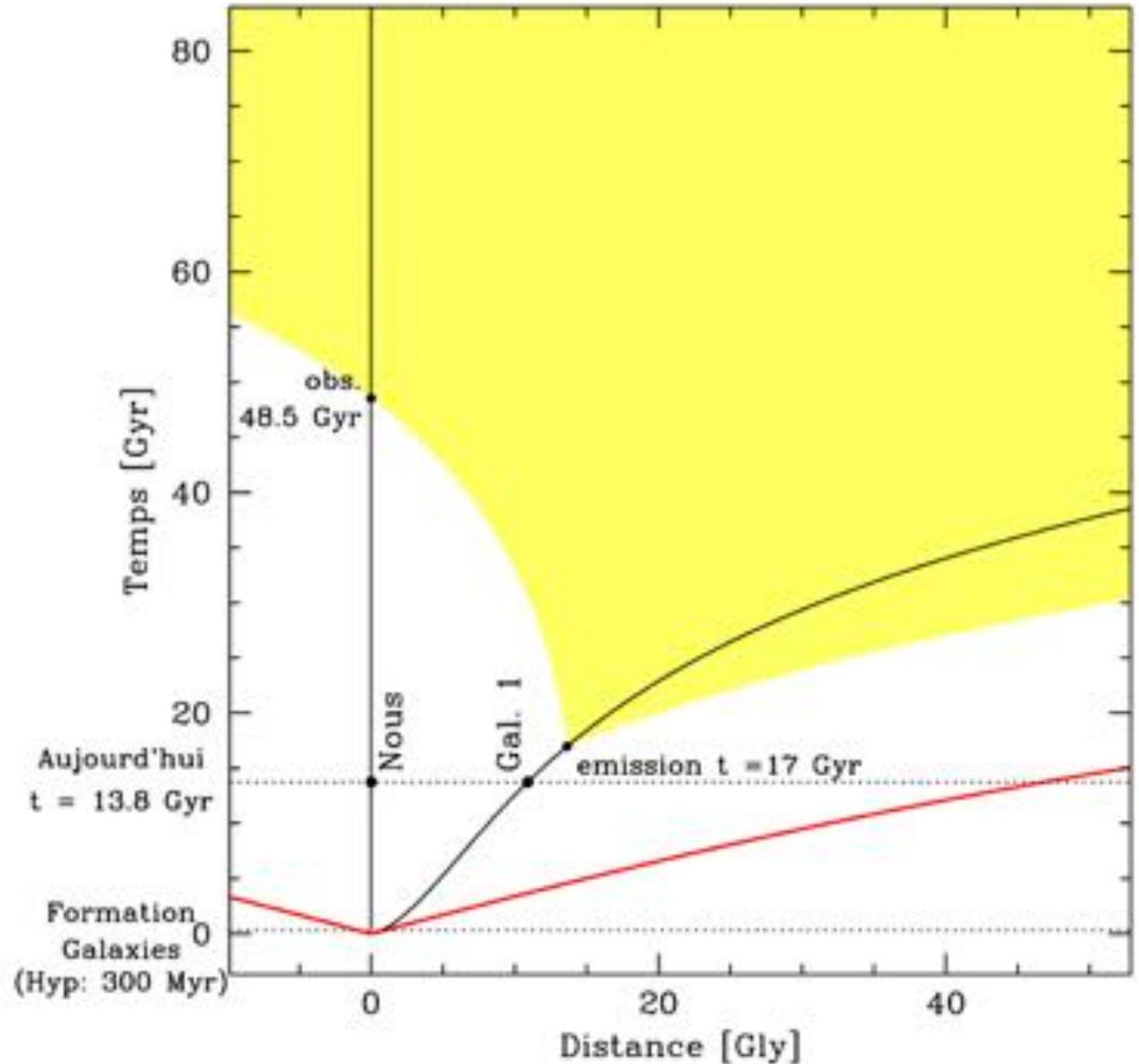
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

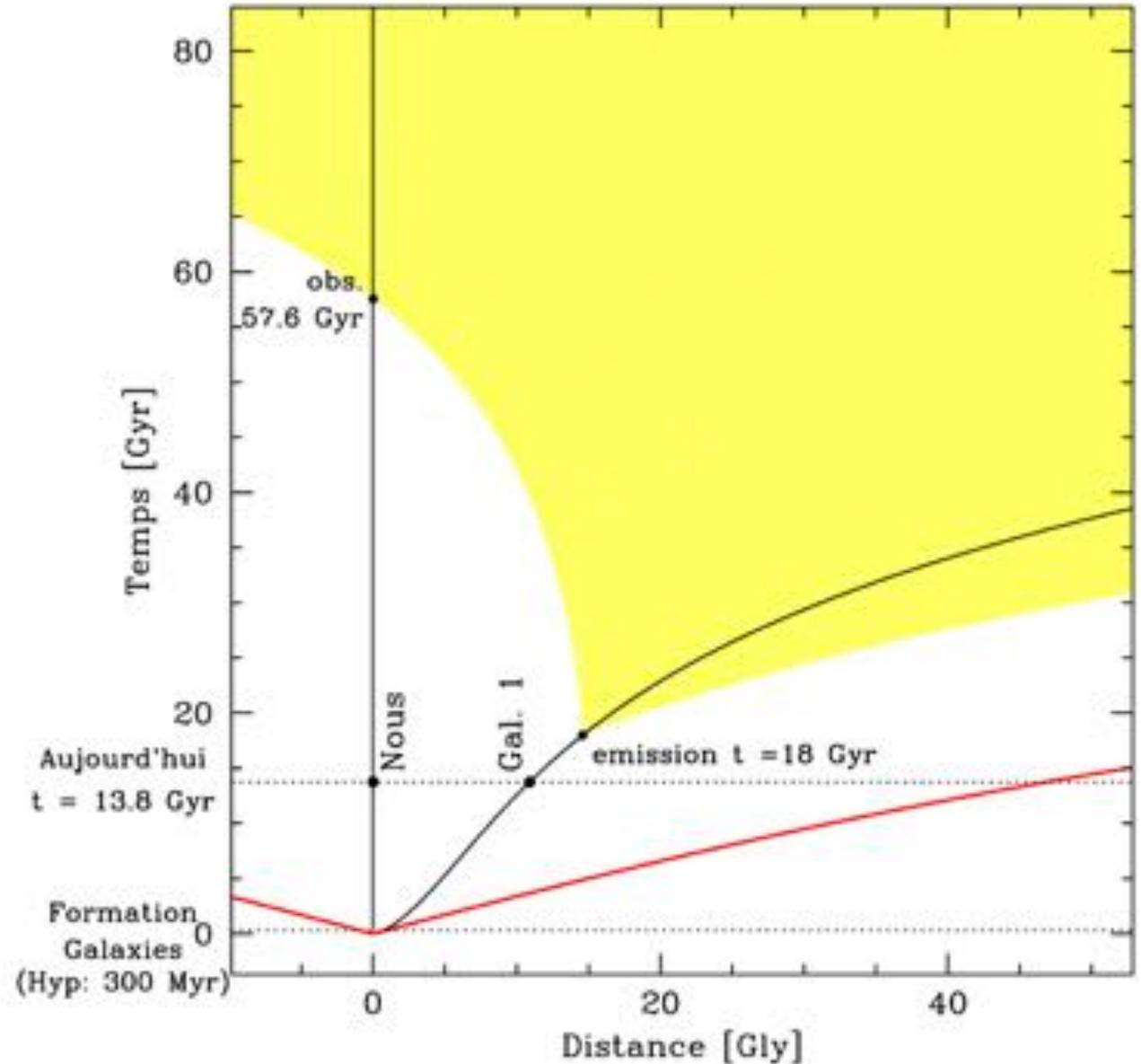
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

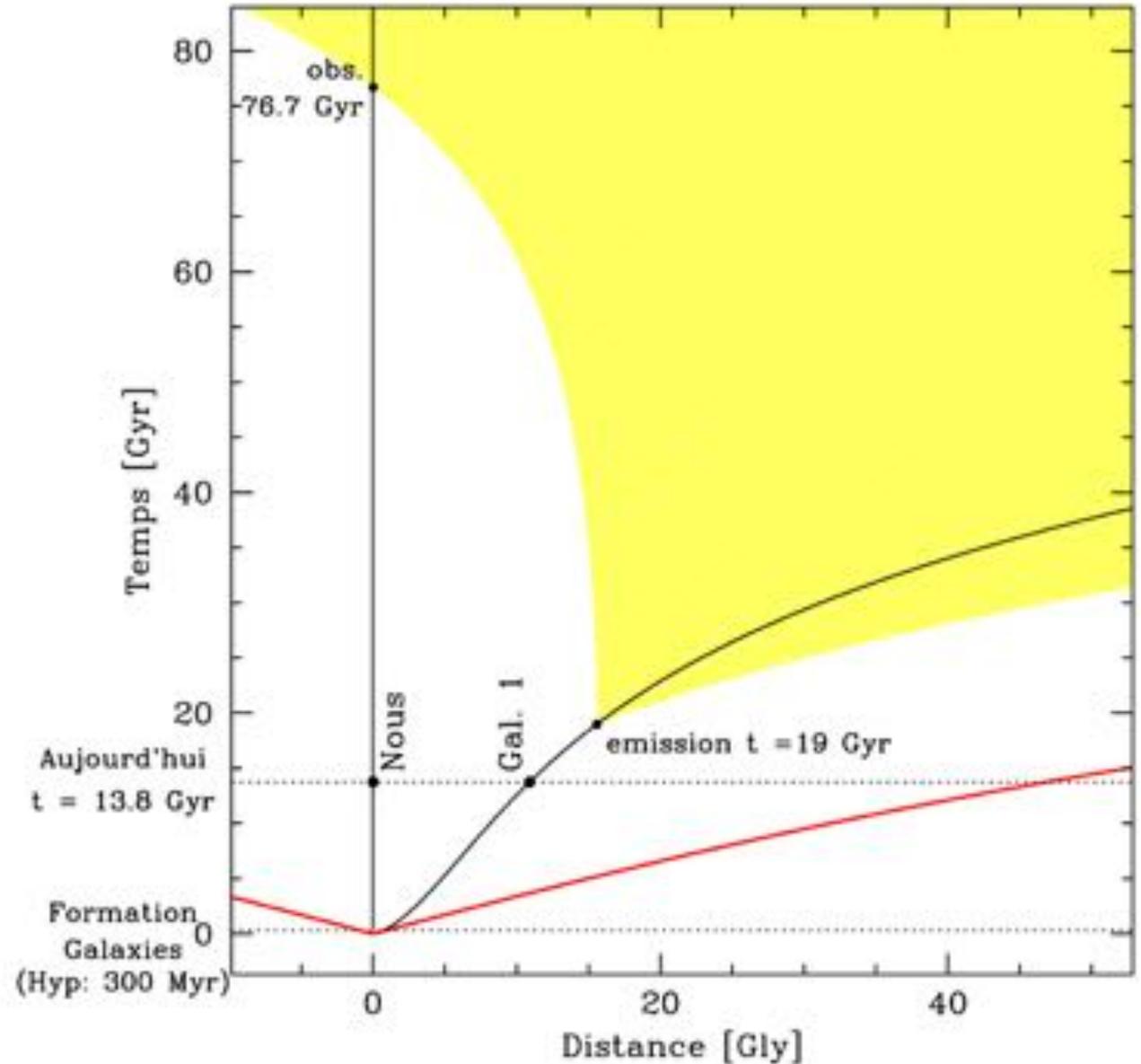
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

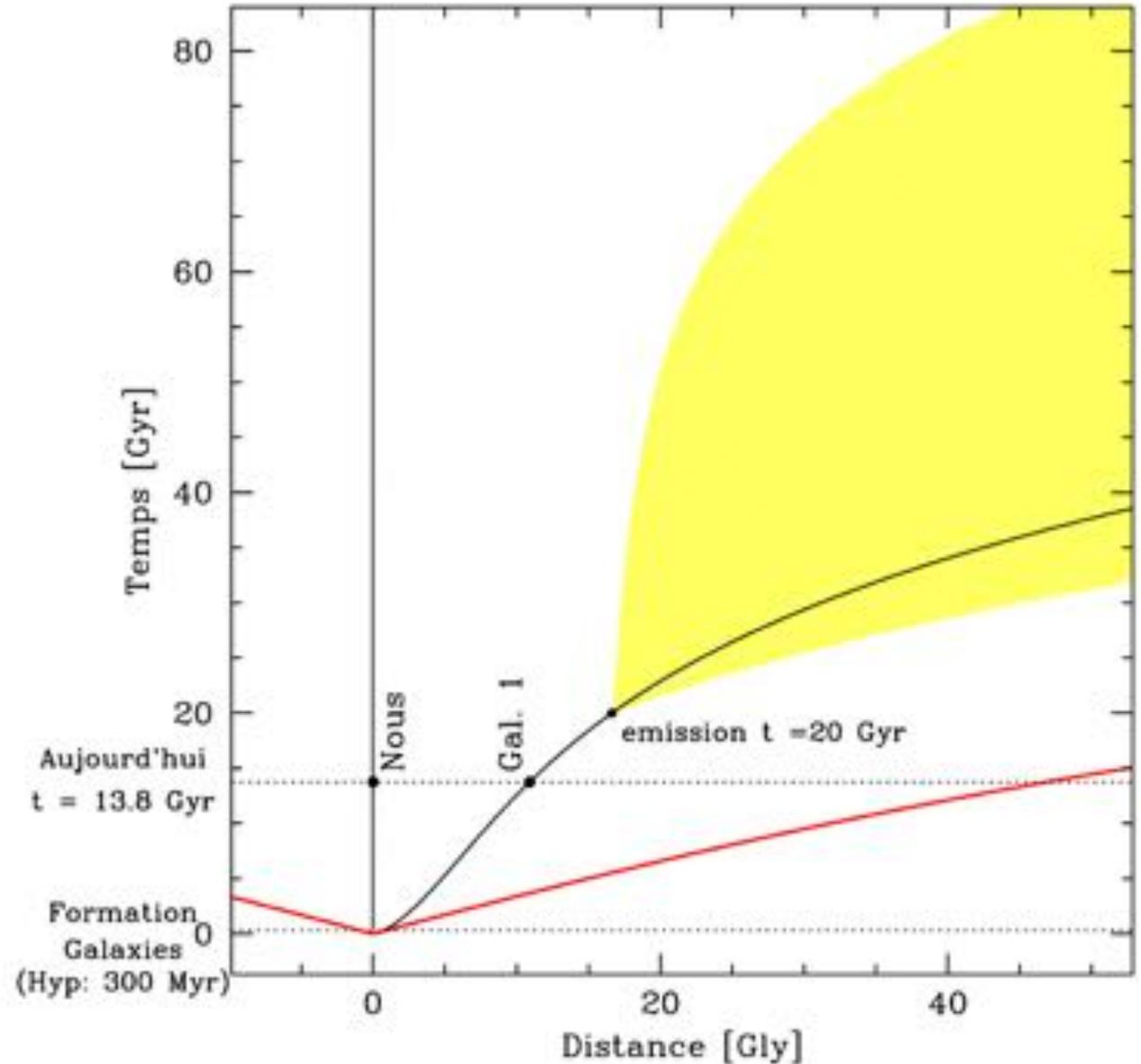
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

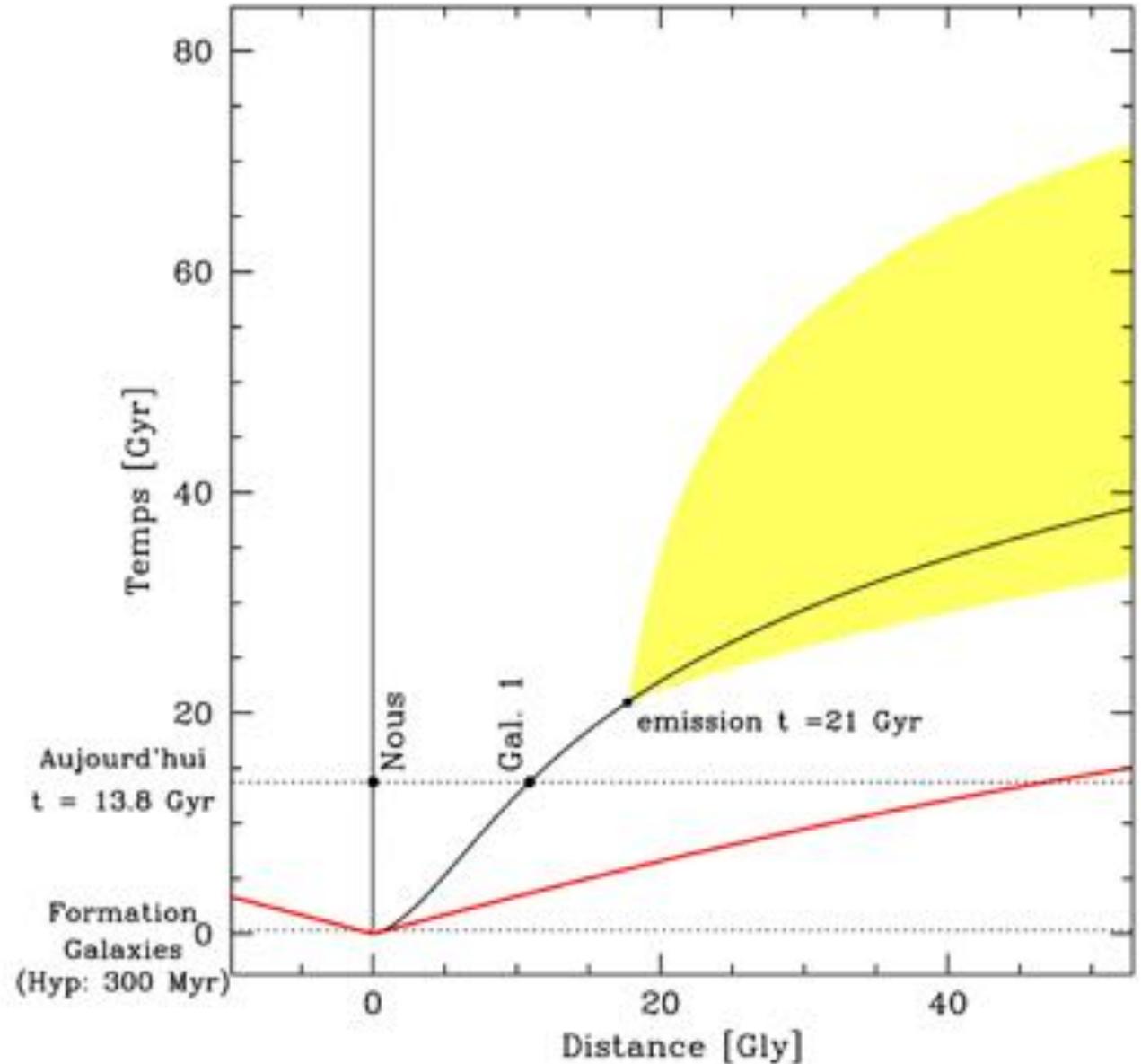
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

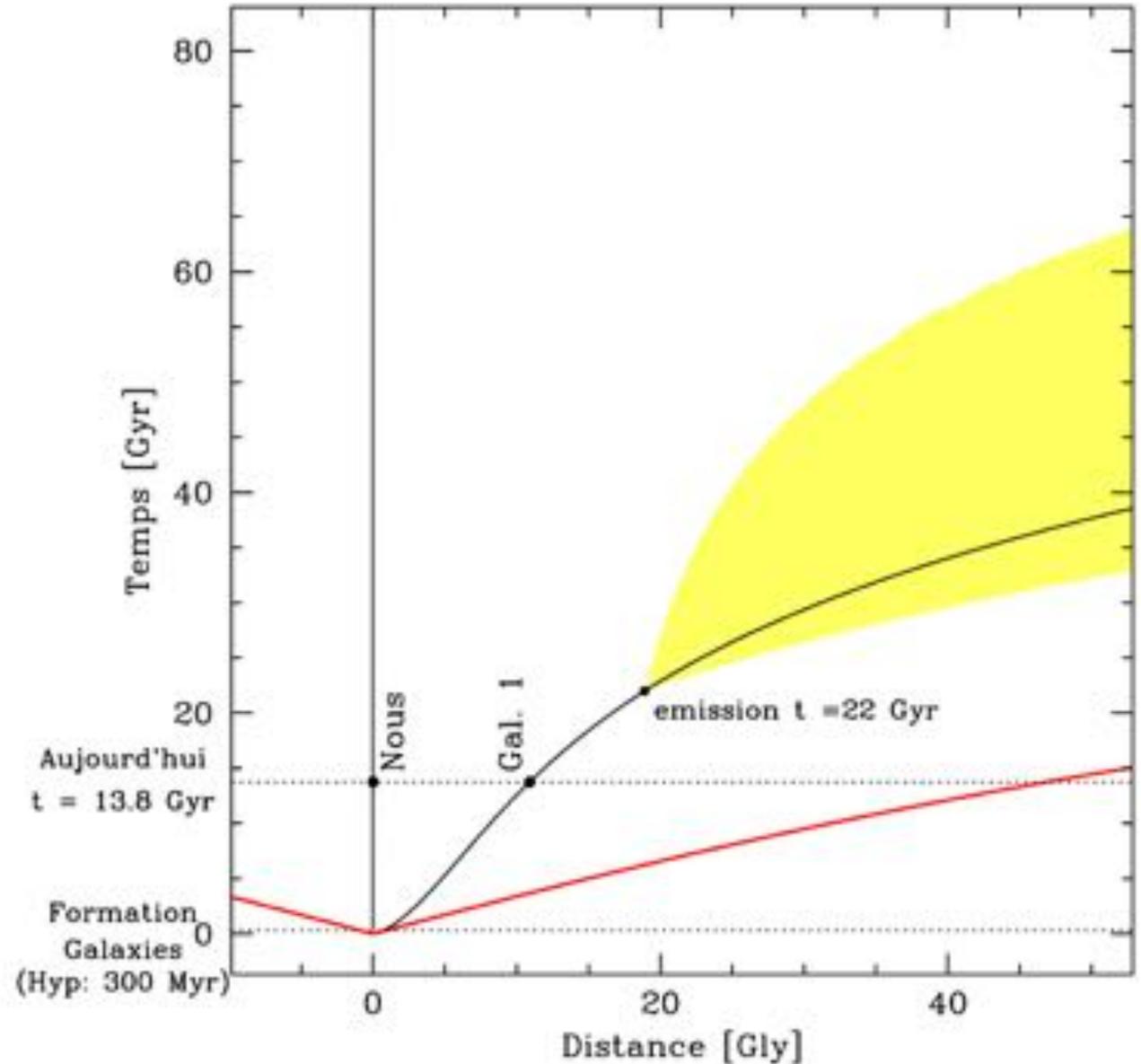
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

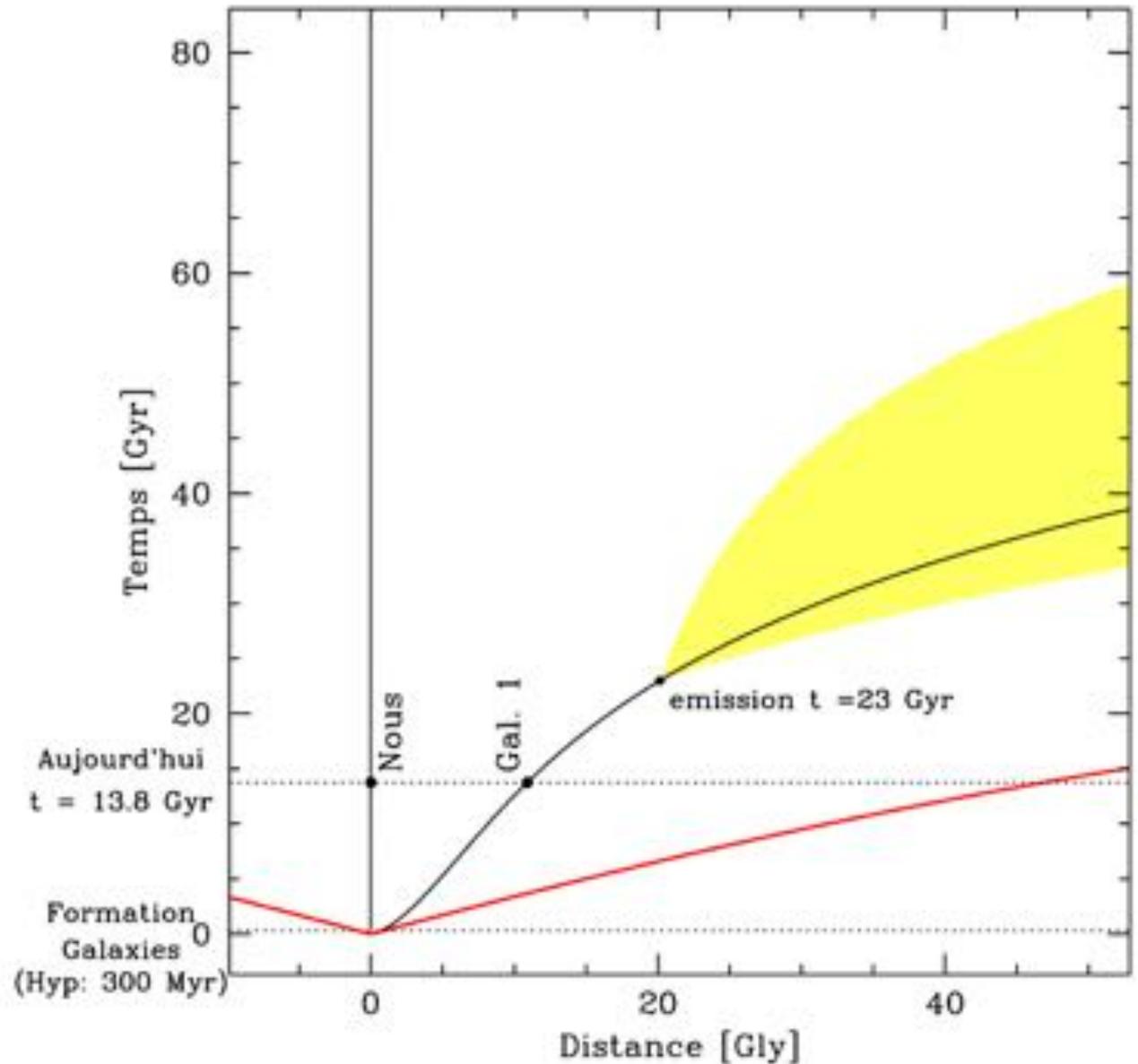
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

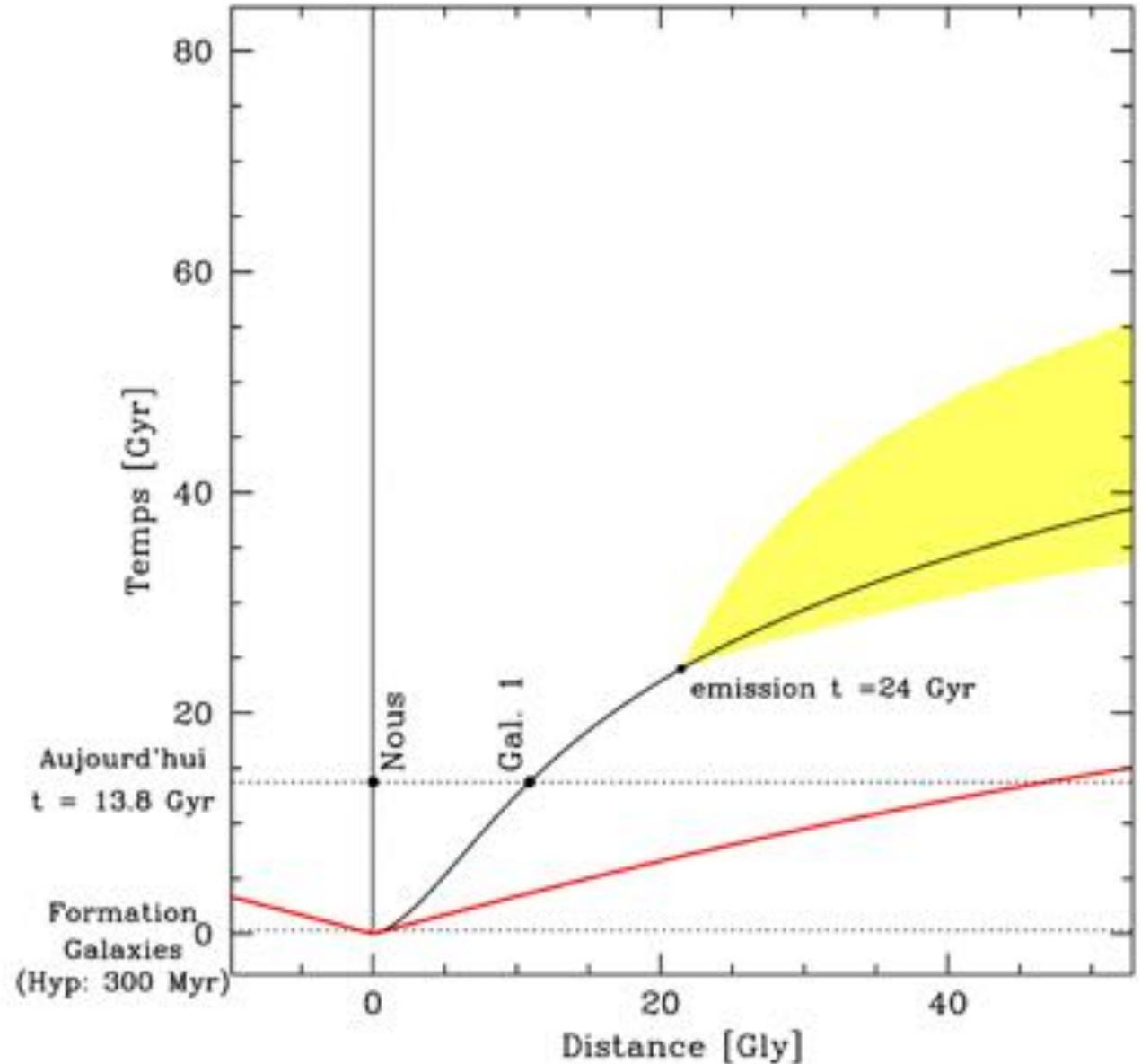
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

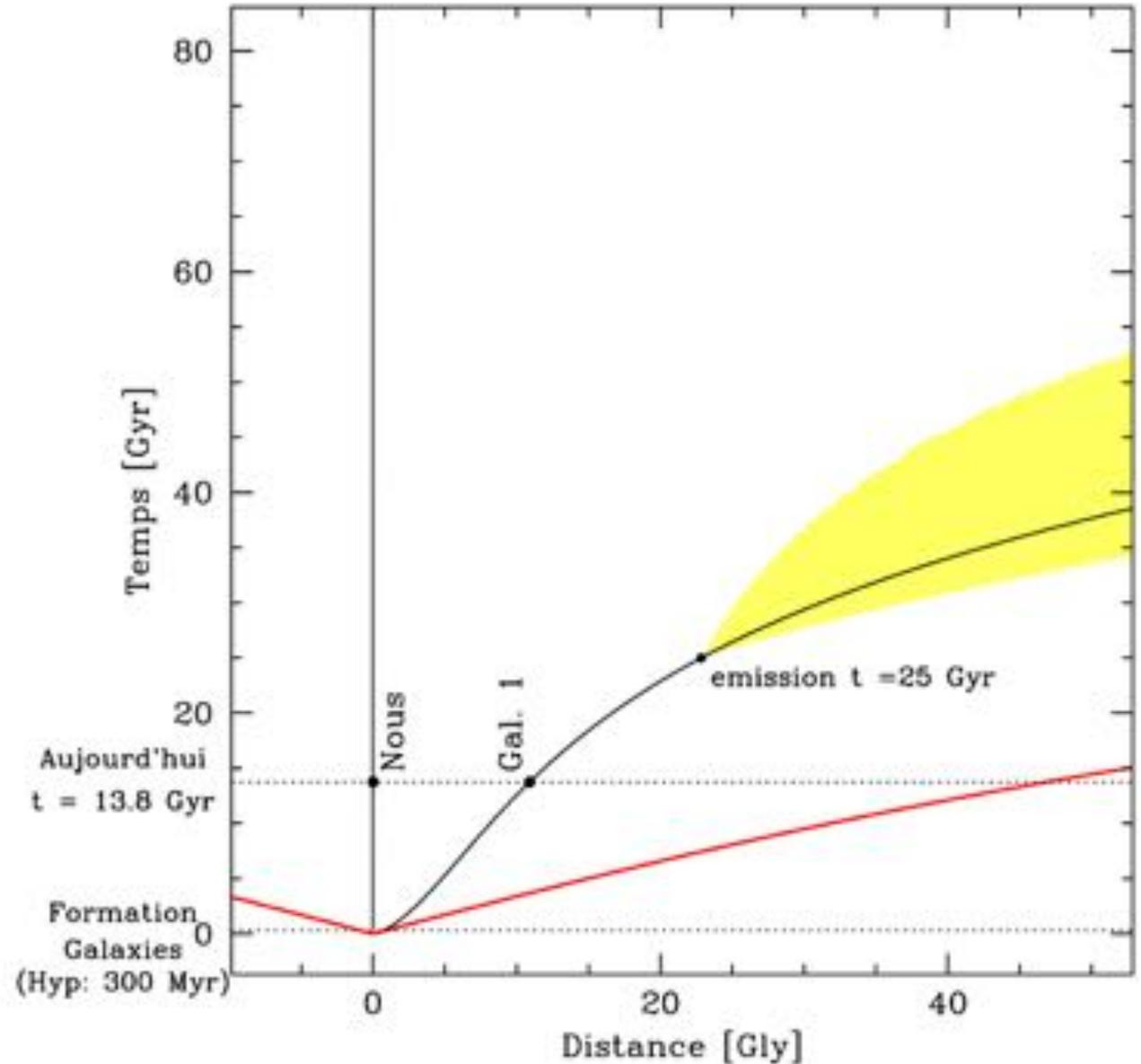
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

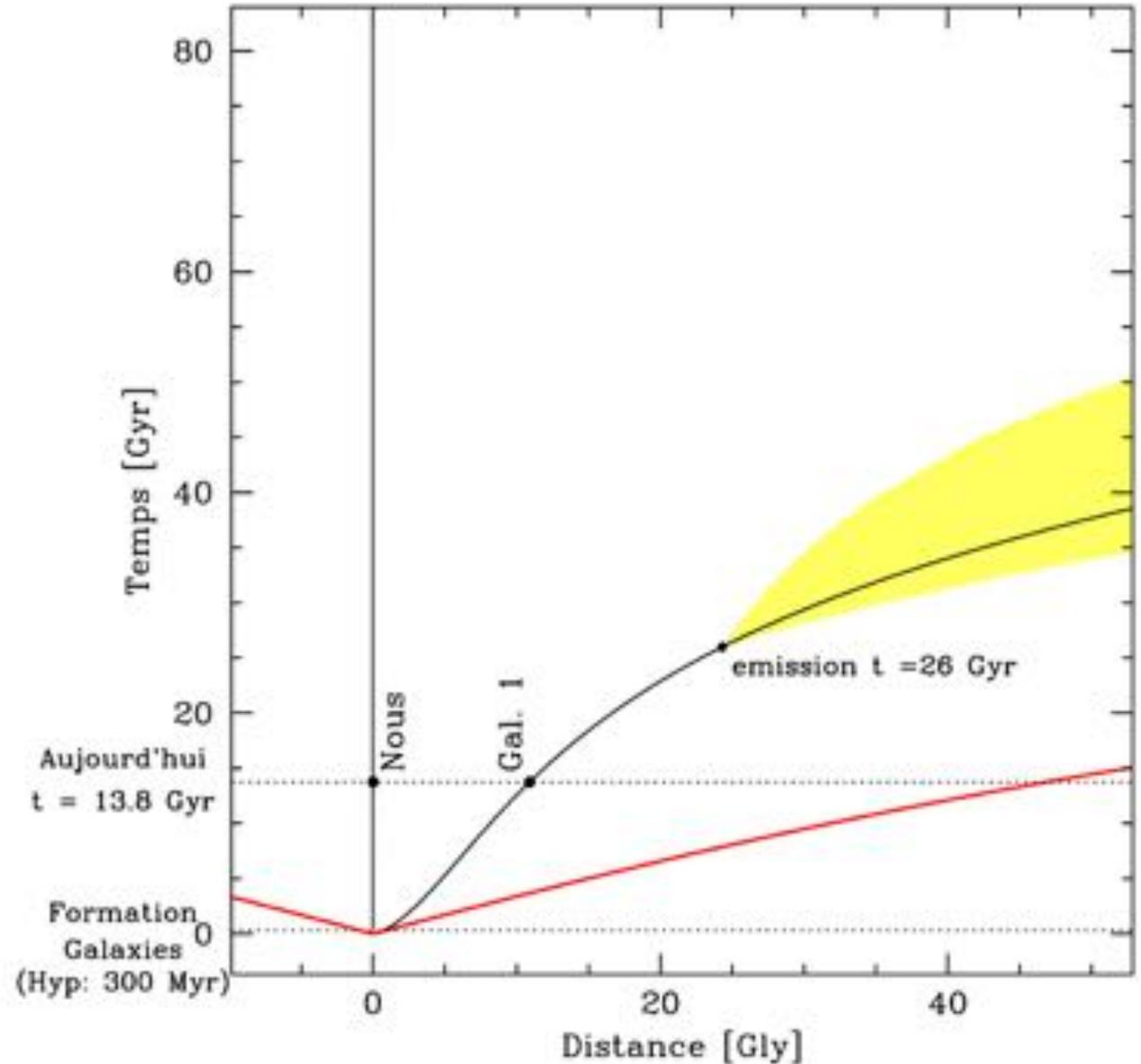
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

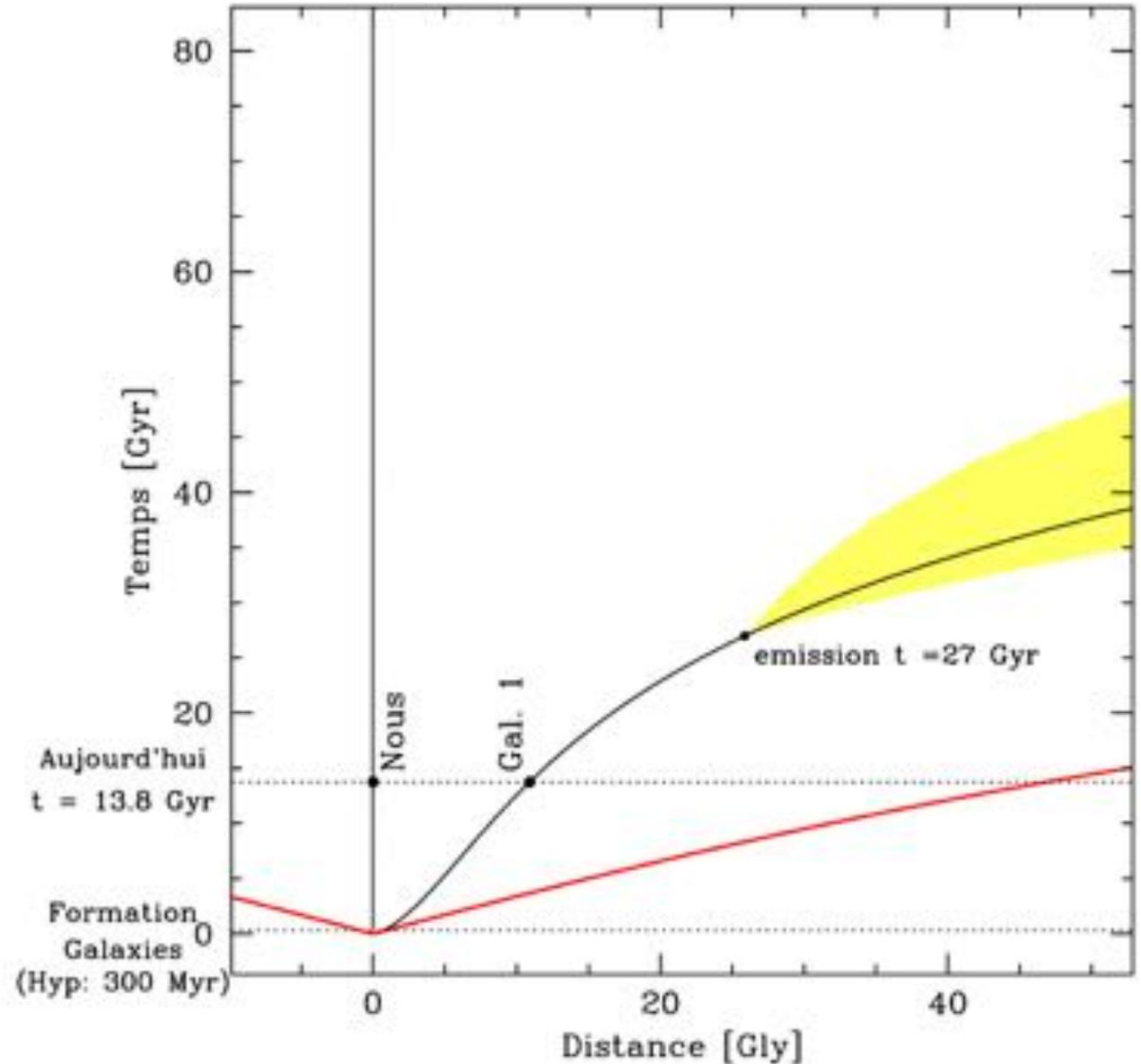
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

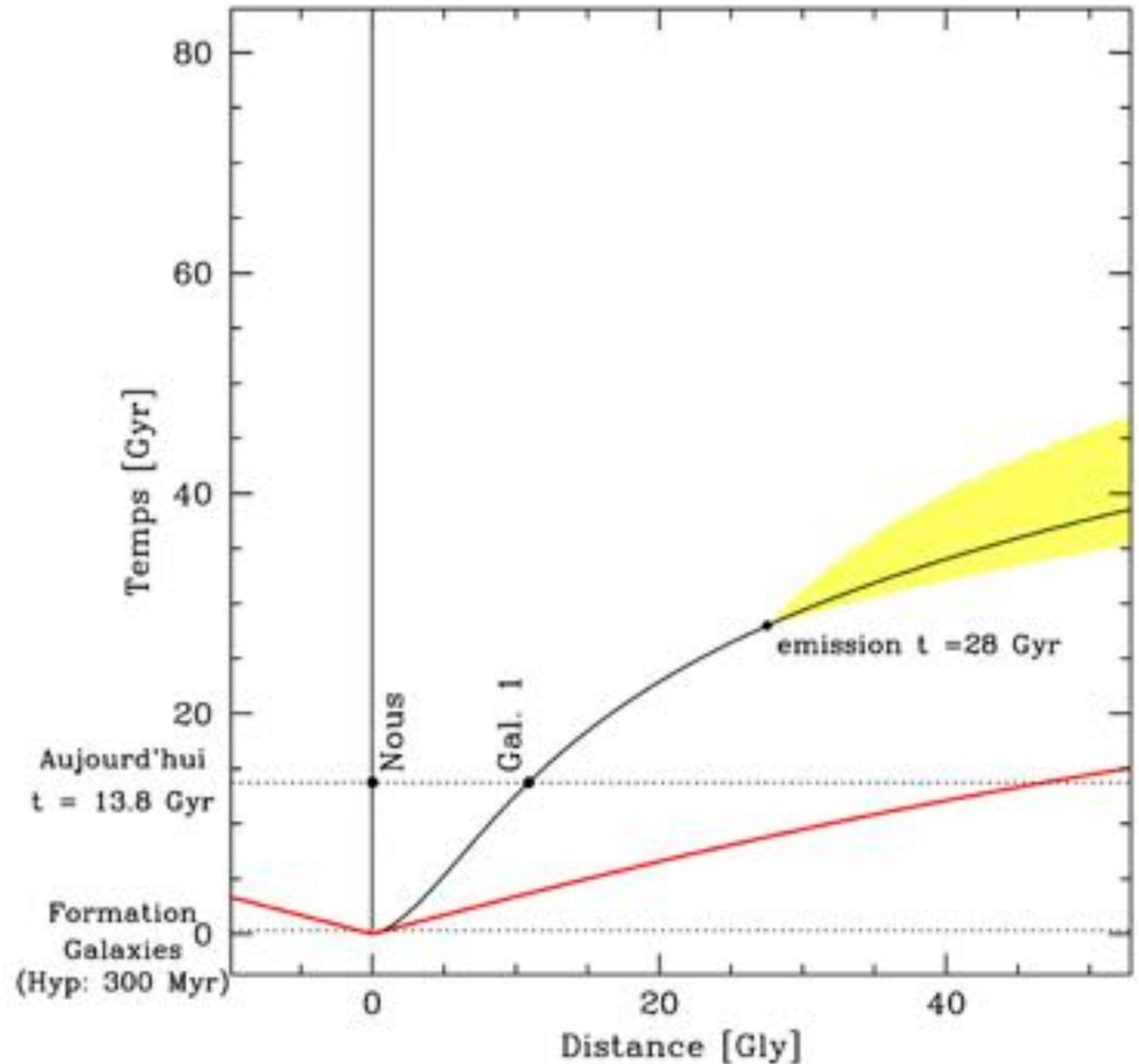
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

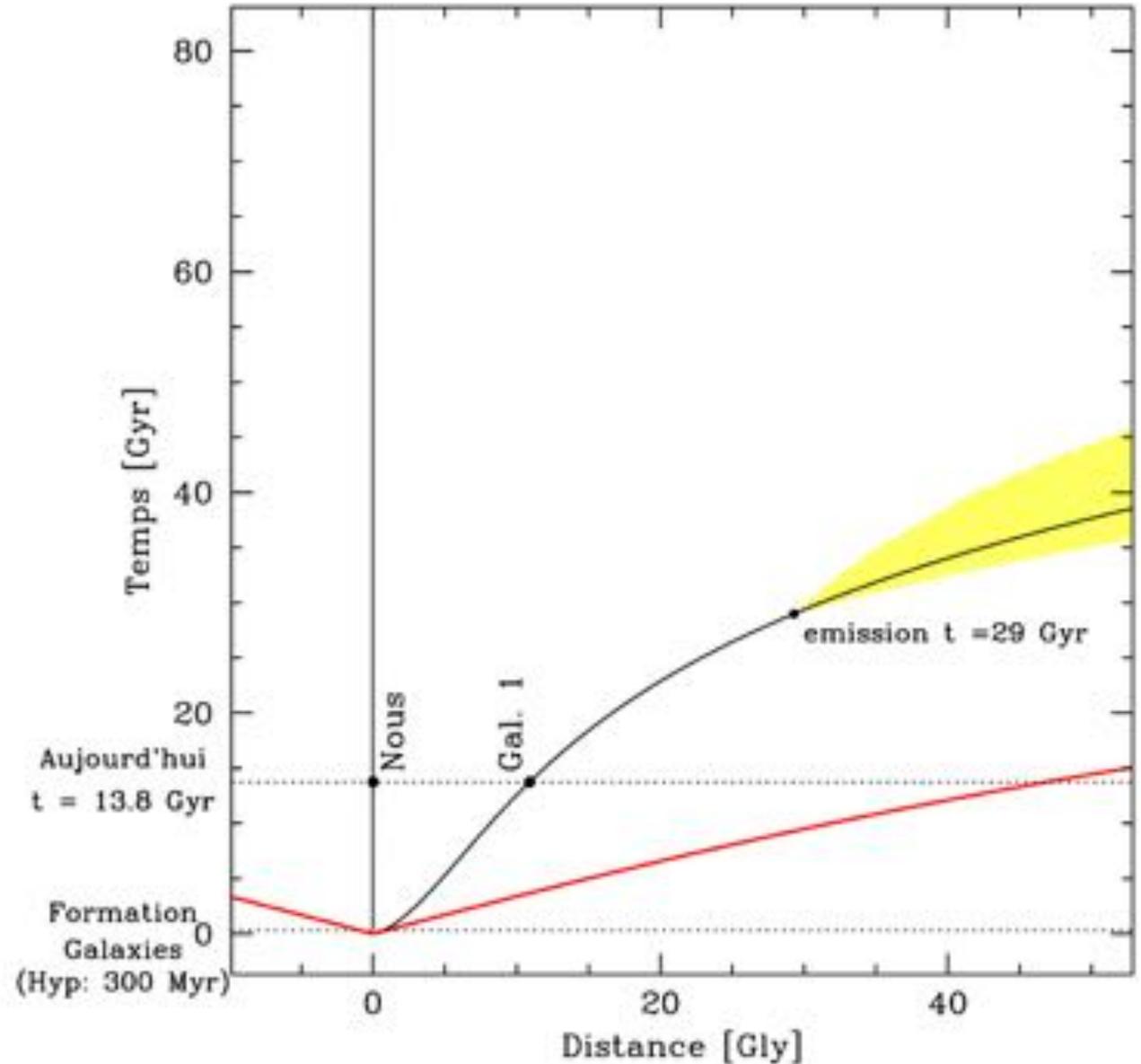
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

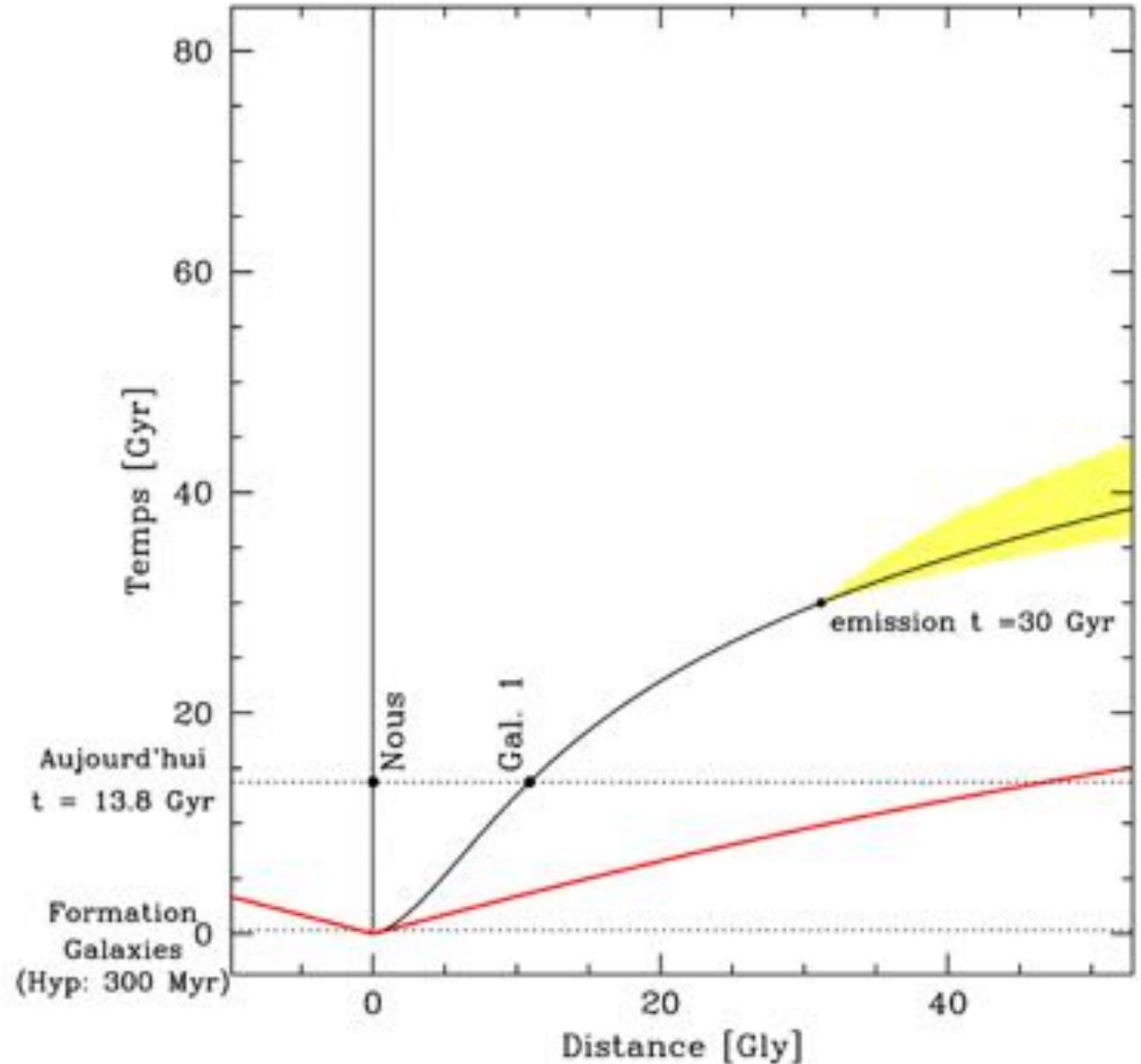
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

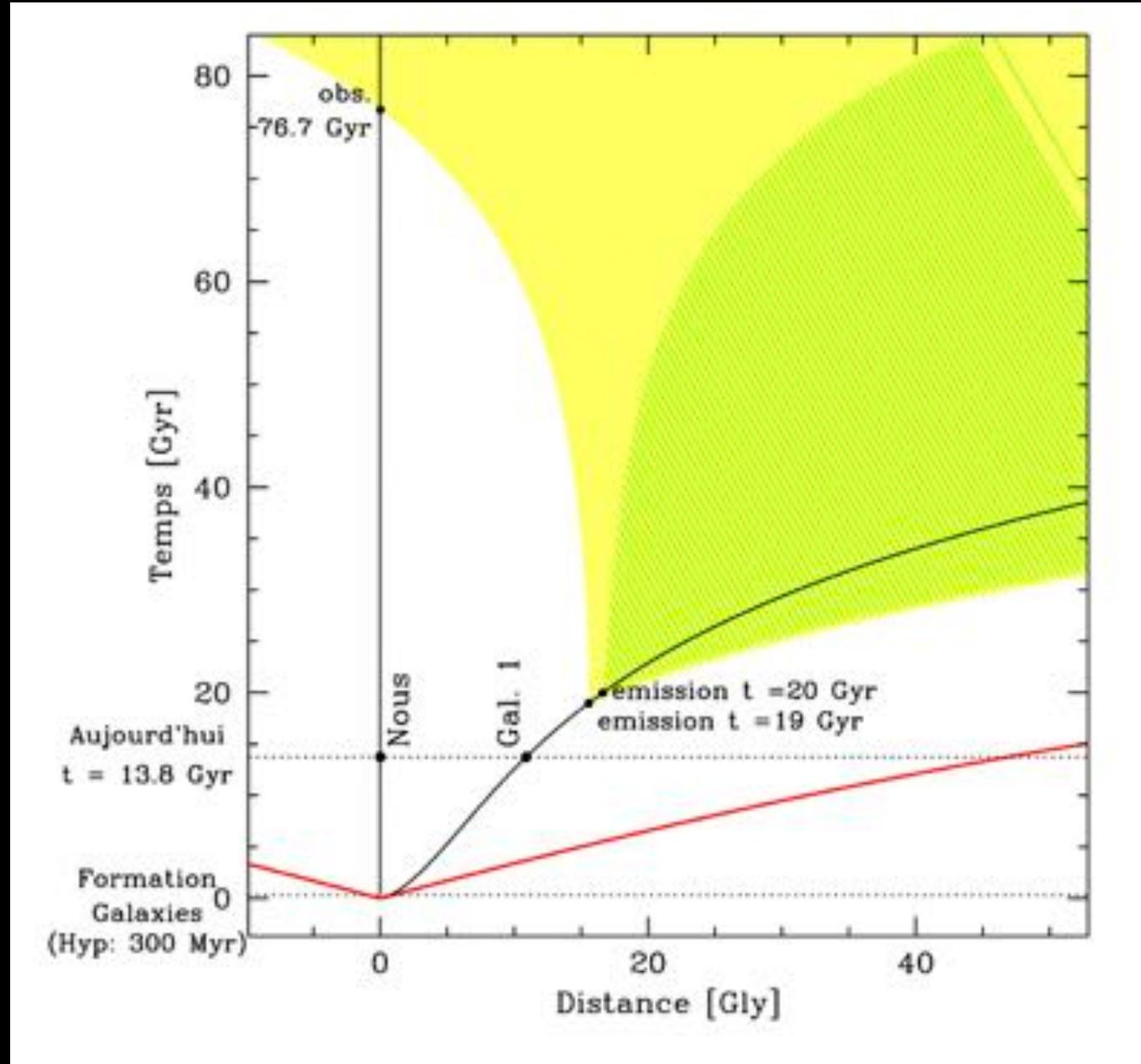
Suivons la lumière émise par la galaxie 1 à différentes époques.



L'Univers dans le futur

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

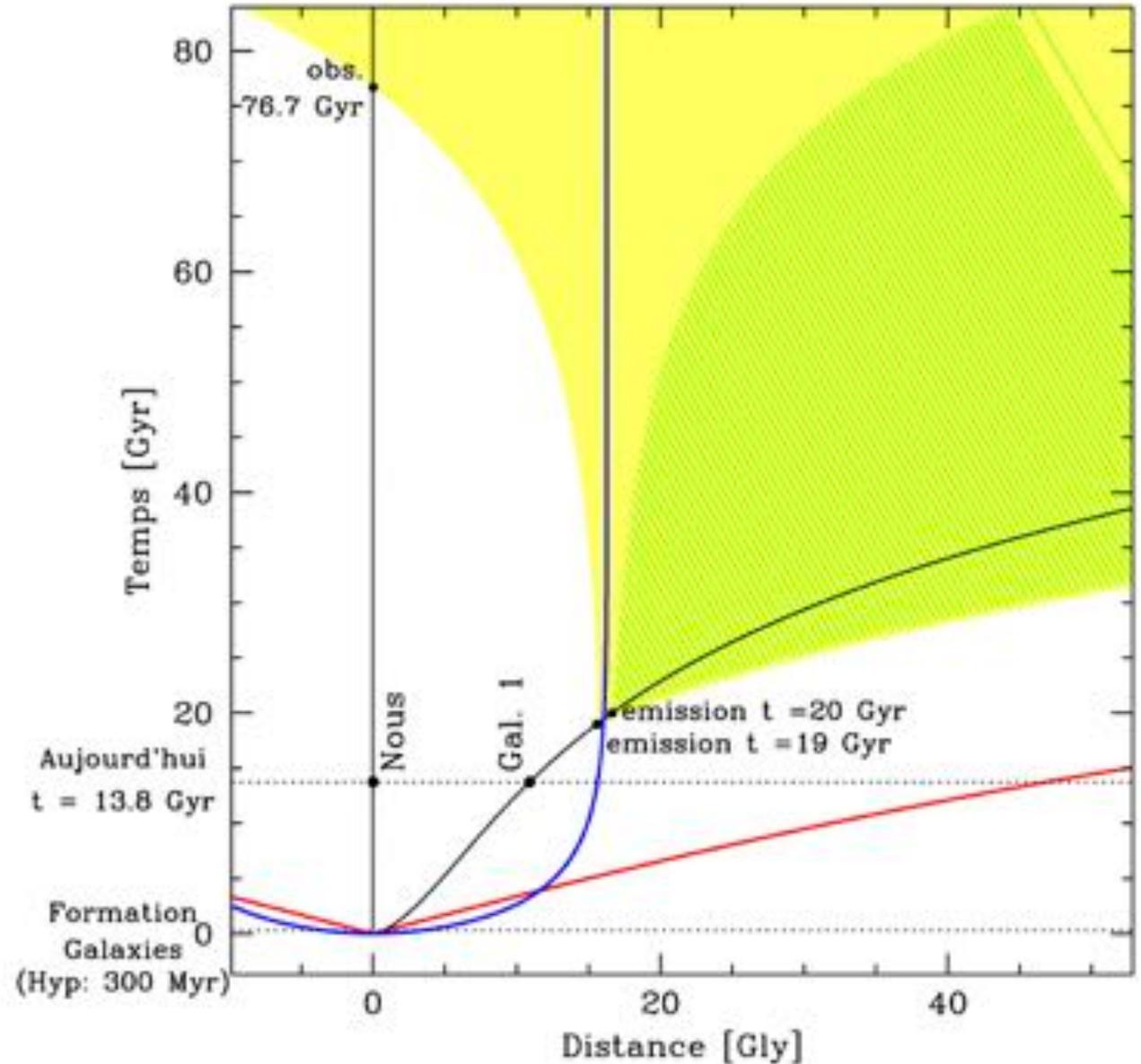
A partir d'un certain âge (19.4 Gyr), la lumière émise par la galaxie 1 ne nous parviendra jamais.



L'Univers dans le futur

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

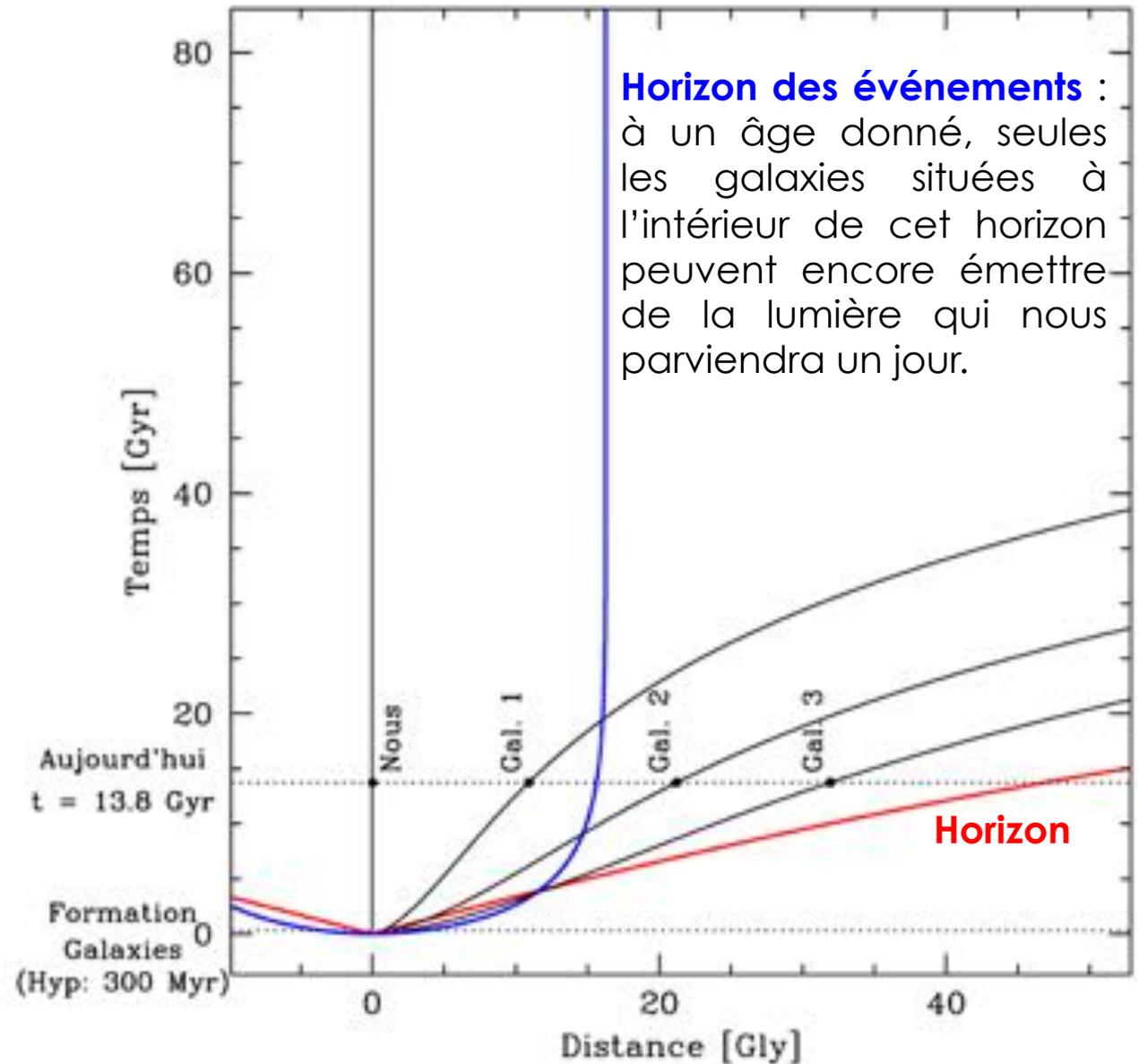
Ceci définit un « horizon des événements »



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

