



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE

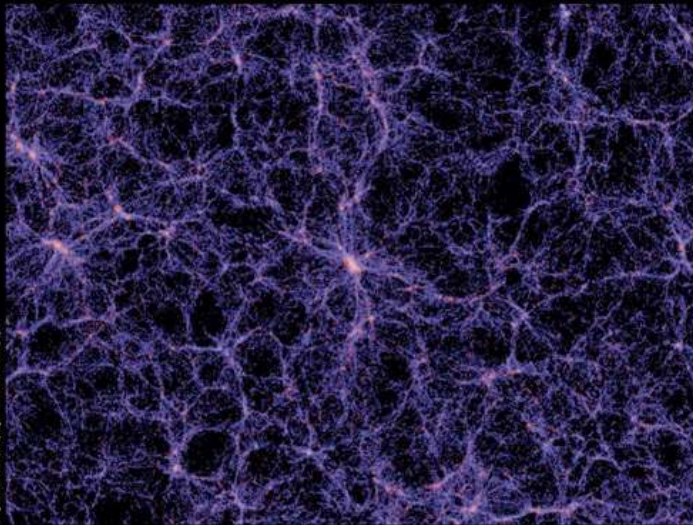


Image : OMBL MPA, V. Springel/Max Planck Institute for Astrophysics

le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

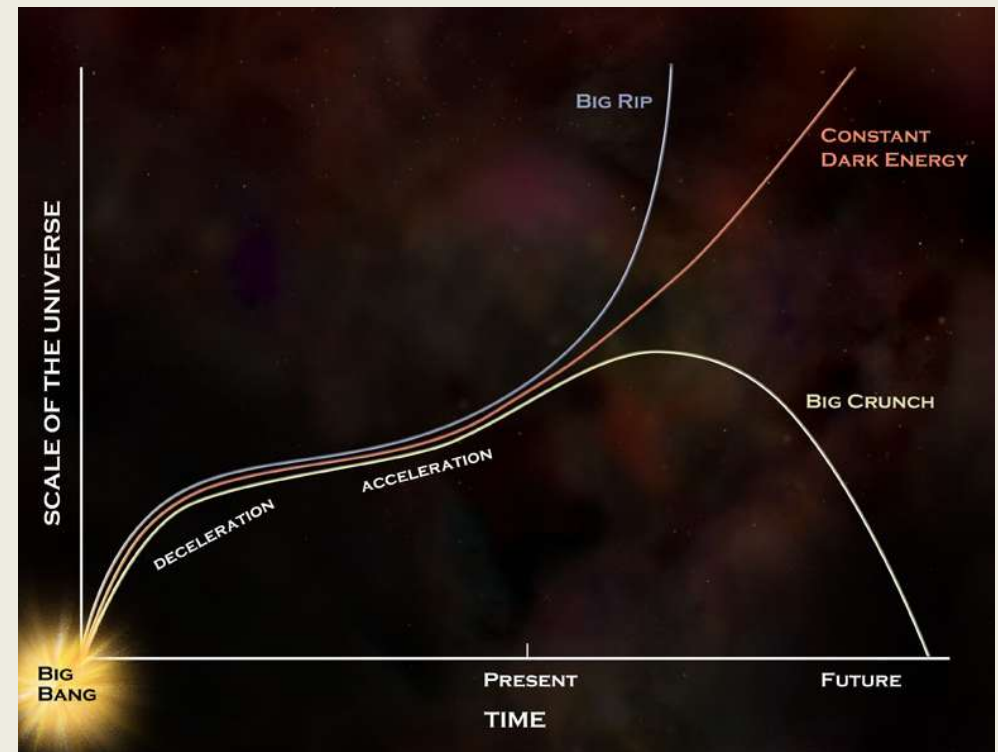
Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>



Cours 14 – 19 décembre 2023

Le futur de l'Univers

<https://mediaserver.unige.ch/play/210511>





UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE

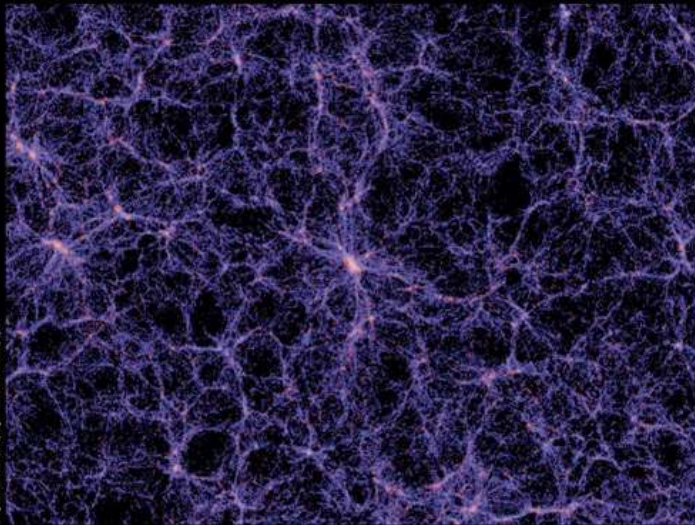


Image : OJGGT, MPA, V. Springel/ESO/STScI

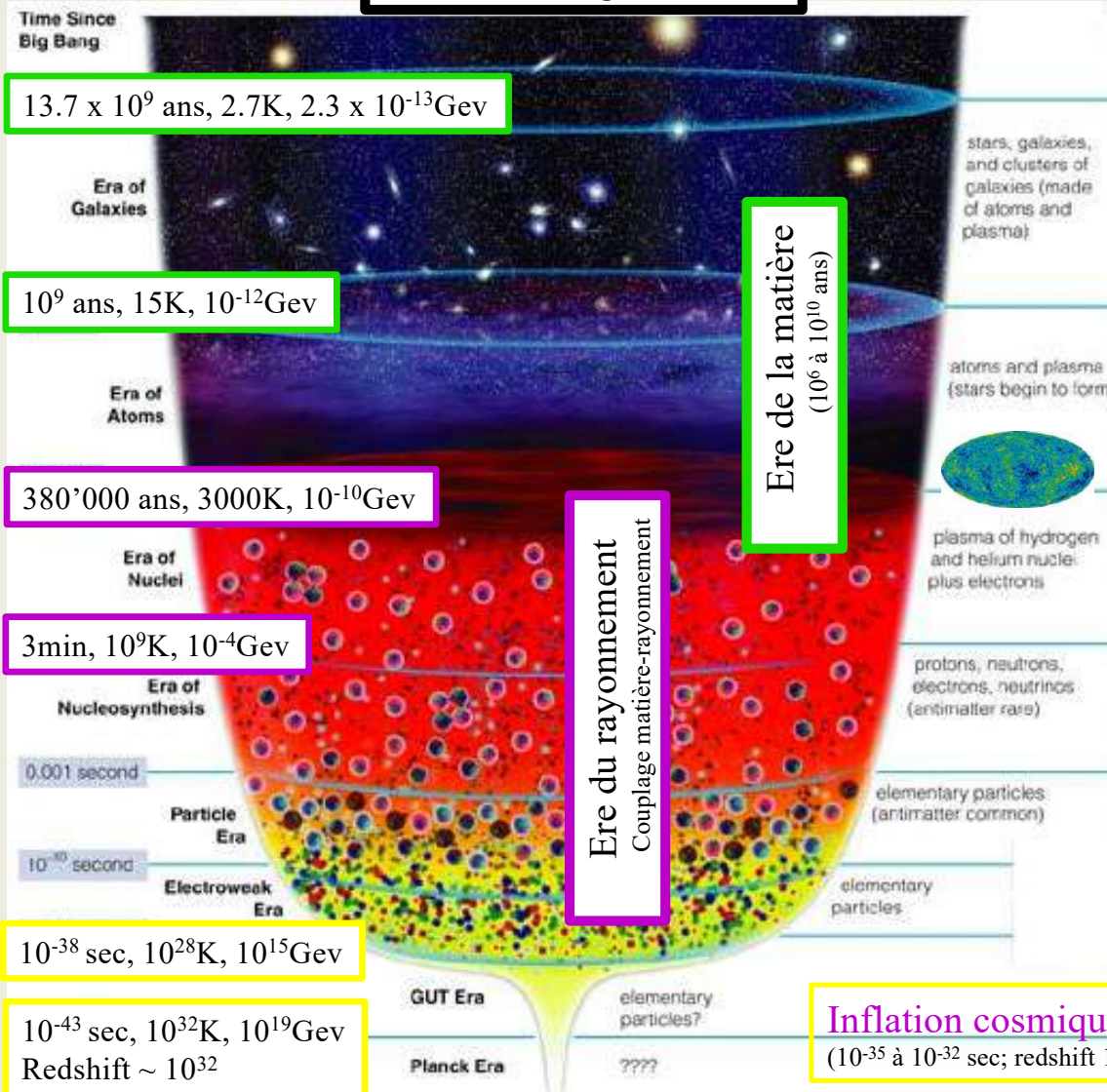
le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Suggestions de lectures:

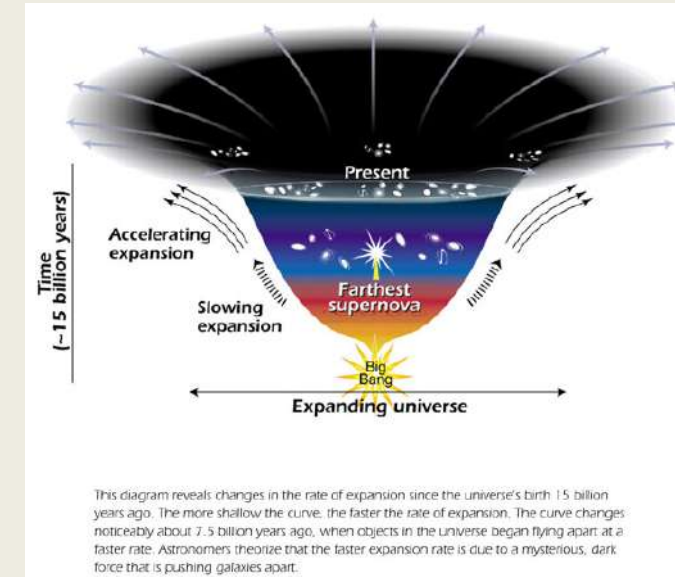
- Les 1001 nuits de l'Univers – D.Elbaz (O.Jacob)
- Big Bang Aux origines de l'univers – Le Monde La vie
- Le destin de l'univers: trous noirs et énergie sombre – J.P.Luminet (Fayard)
- Euclid – Lumière sur l'énergie noire – M.Grousson (Actes Sud)

Ere de l'énergie sombre



Histoire thermique de l'univers en expansion

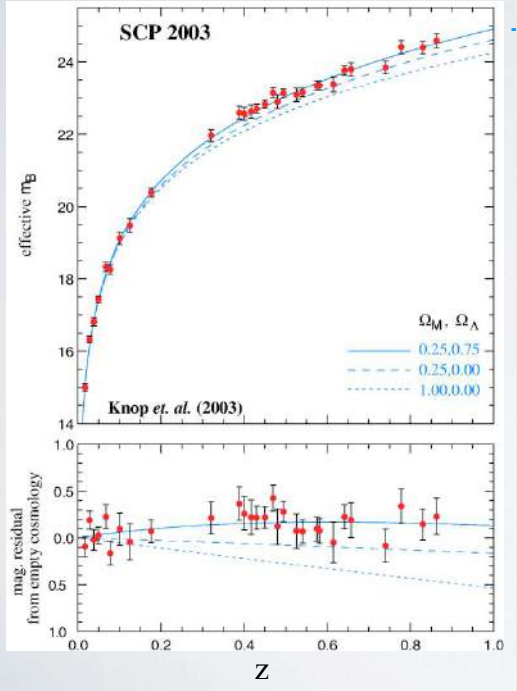
Leçon 20231024 CC



Accélération de l'expansion de l'univers

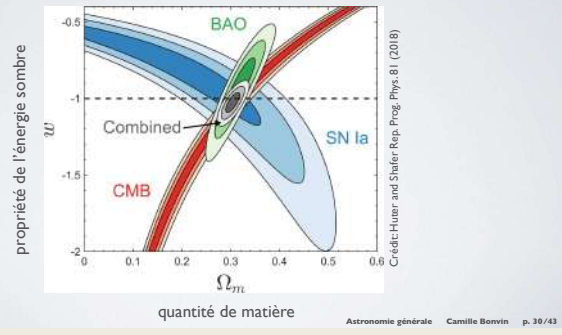
Leçon 20231114 CB

Constante cosmologique

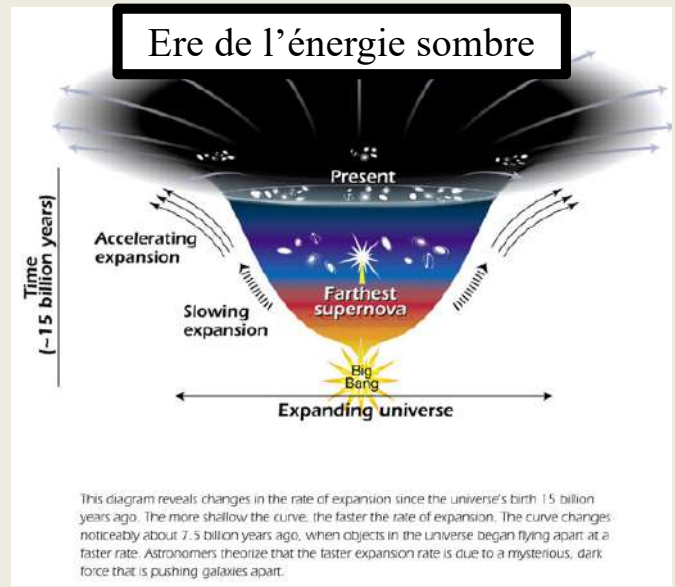
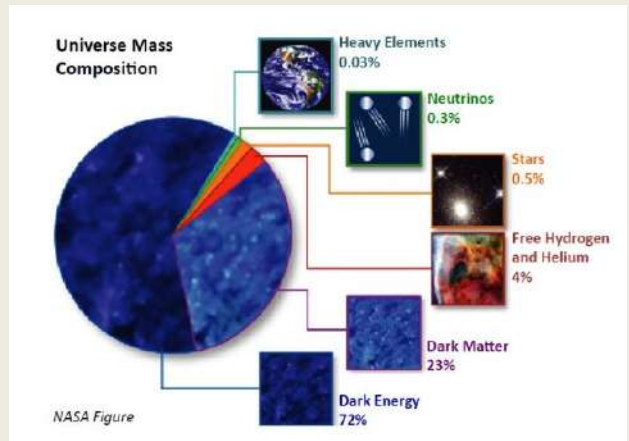


Contraintes

Equation d'état $w = \frac{P}{\rho}$
Constante cosmologique $w = -1$ Accélération si $w < -1/3$



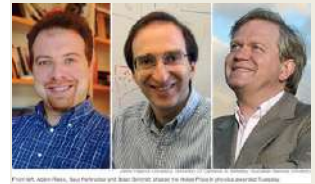
Composition de la matière



Expansion accélérée

Conclusions

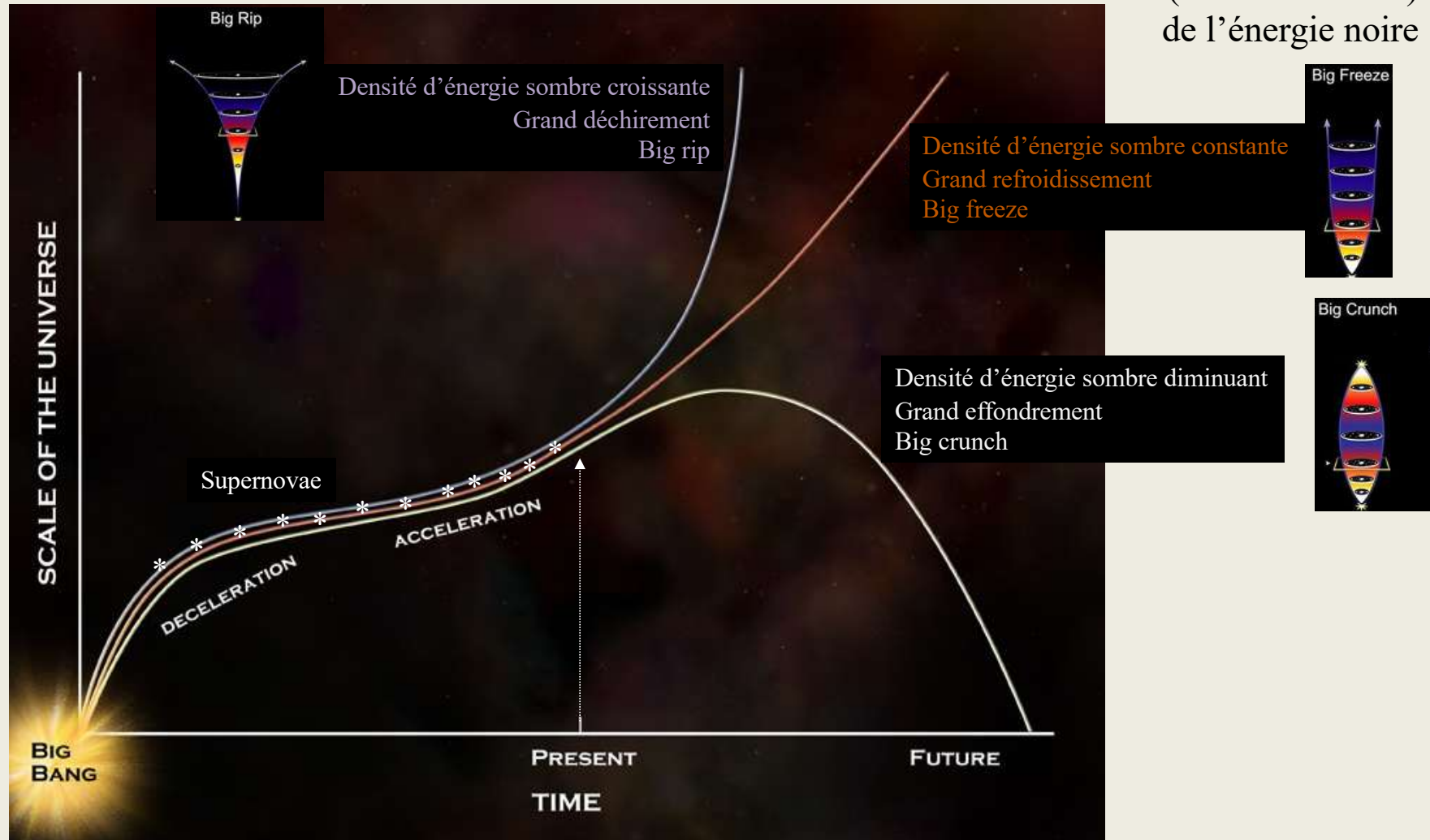
- ♦ La découverte de l'**expansion accélérée** de l'univers a bouleversé notre compréhension du cosmos
- ♦ Pour l'expliquer il y a **deux** possibilités:
 - Rajouter de l'**énergie sombre**, avec pression négative
 - Modifier les **lois** de la **gravité** à très grande distance



Adam G. Riess (High-z SNe project)
Saul Perlmutter (SNe cosmology project)
Brian P. Schmidt
Prix Nobel de physique 2011 "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

Futur de l'Univers

Trois scénarios selon la nature (variable ou non) de l'énergie noire



Futur du système solaire

Dans ~ 8 milliards d'années, le soleil devient une naine blanche

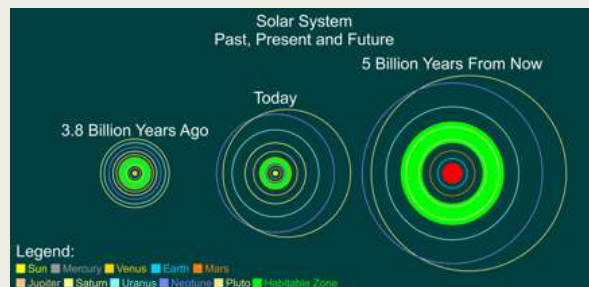
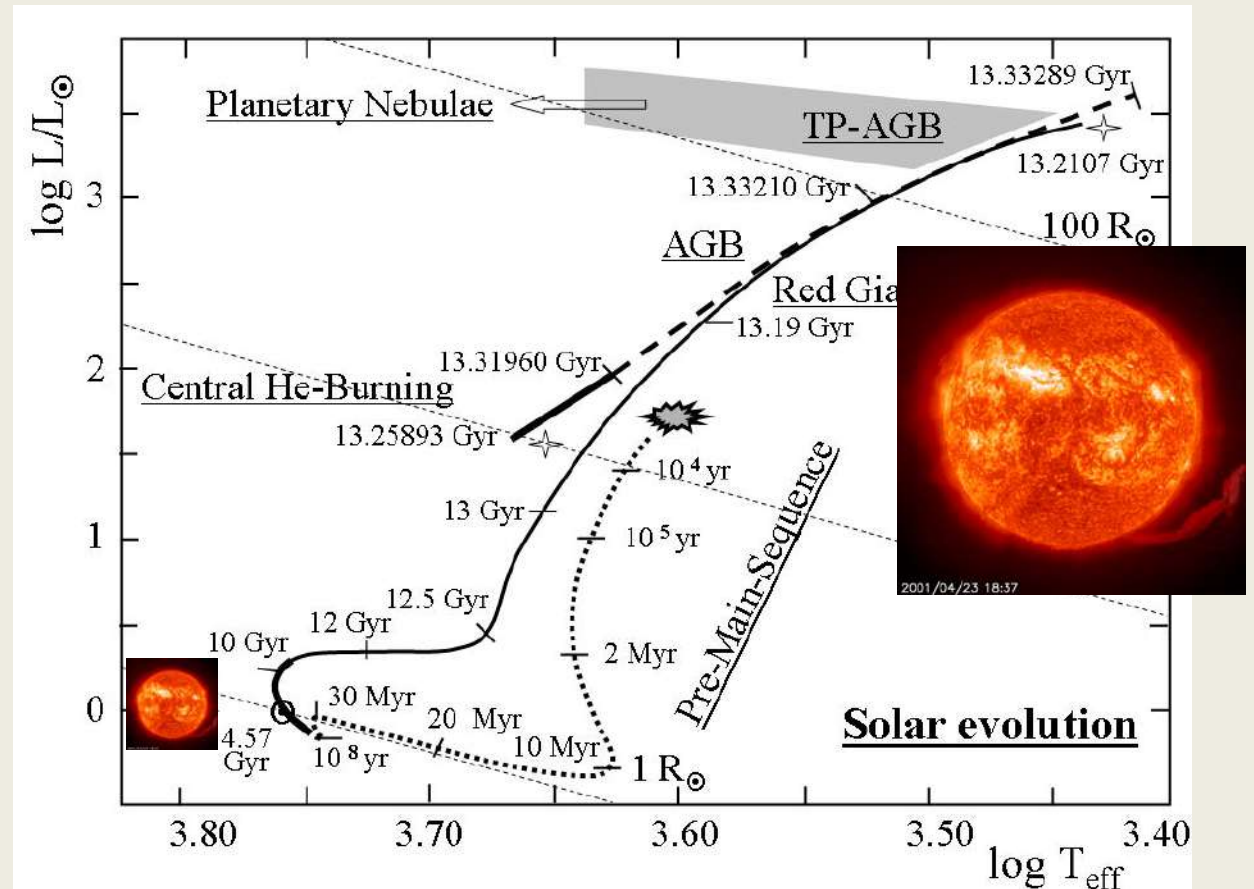
Dans ~ 5 milliards d'années, le soleil devient une géante rouge
Sa luminosité augmente d'un facteur ~ 2500
Engloutit Mercure, Vénus, et probablement la Terre

[Collision entre la Voie Lactée et Andromède]

Augmentation de la luminosité du soleil

→ Augmentation de la température de surface de la Terre

→ Évaporation des océans dans ~ 1.8 milliard d'années



Futur de la Voie Lactée

Collision entre la Voie Lactée et Andromède – Milkomeda

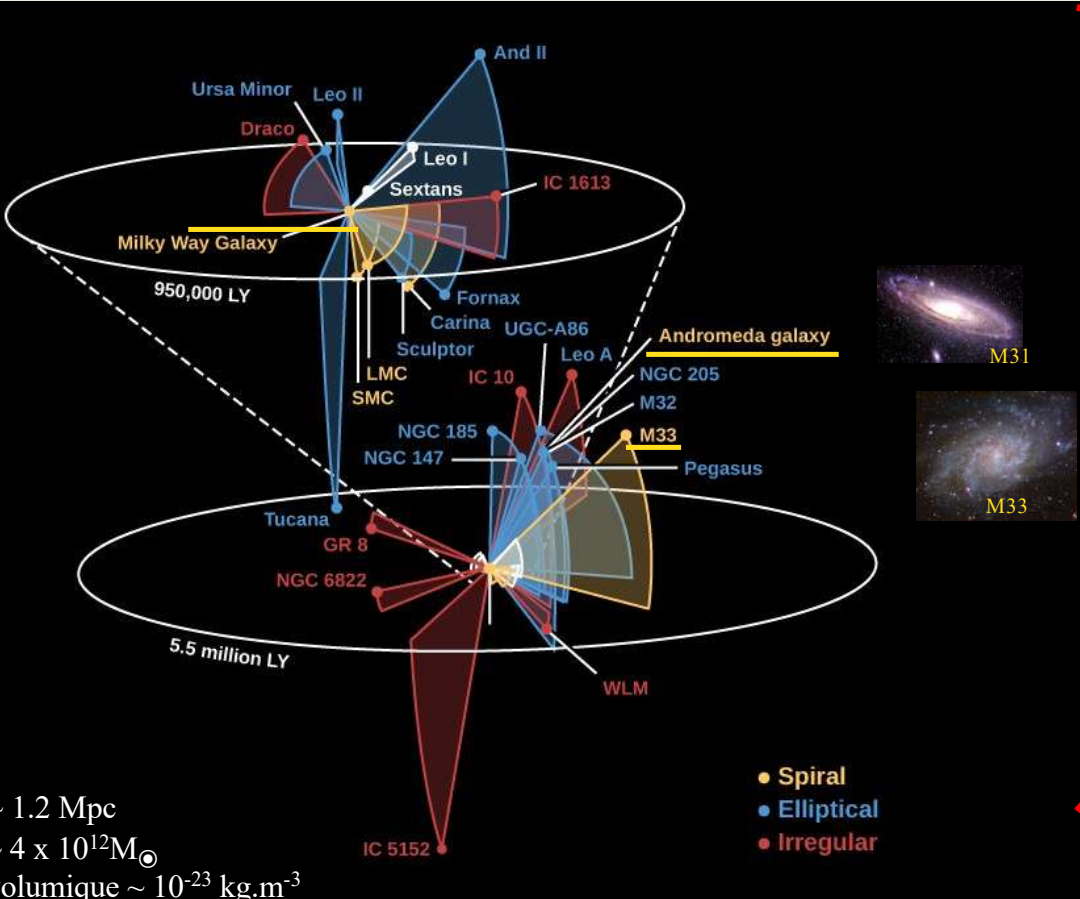
Dans 4 à 8 milliards d'années – 17.8 à 21.8 milliards d'années après le Big Bang



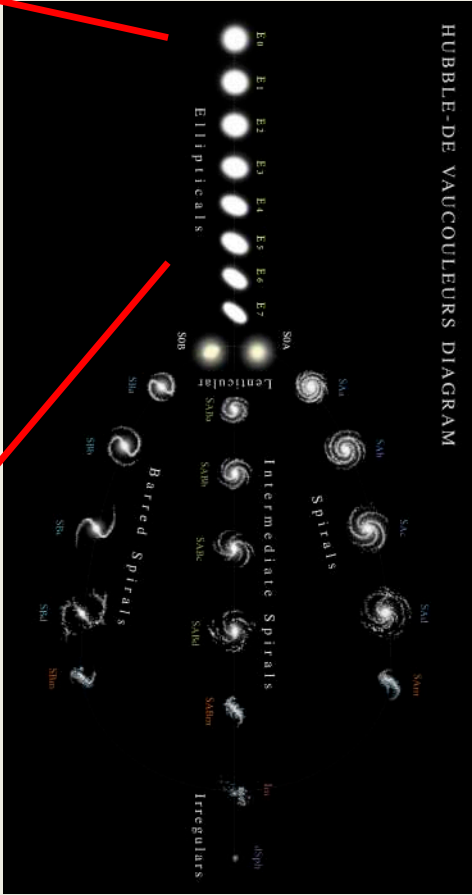
Futur de la Voie Lactée et du Groupe Local

Leçons 20231031 &
20231128 CC

Dans 10^{11} à 10^{12} années (100 à 1000 milliards d'années)



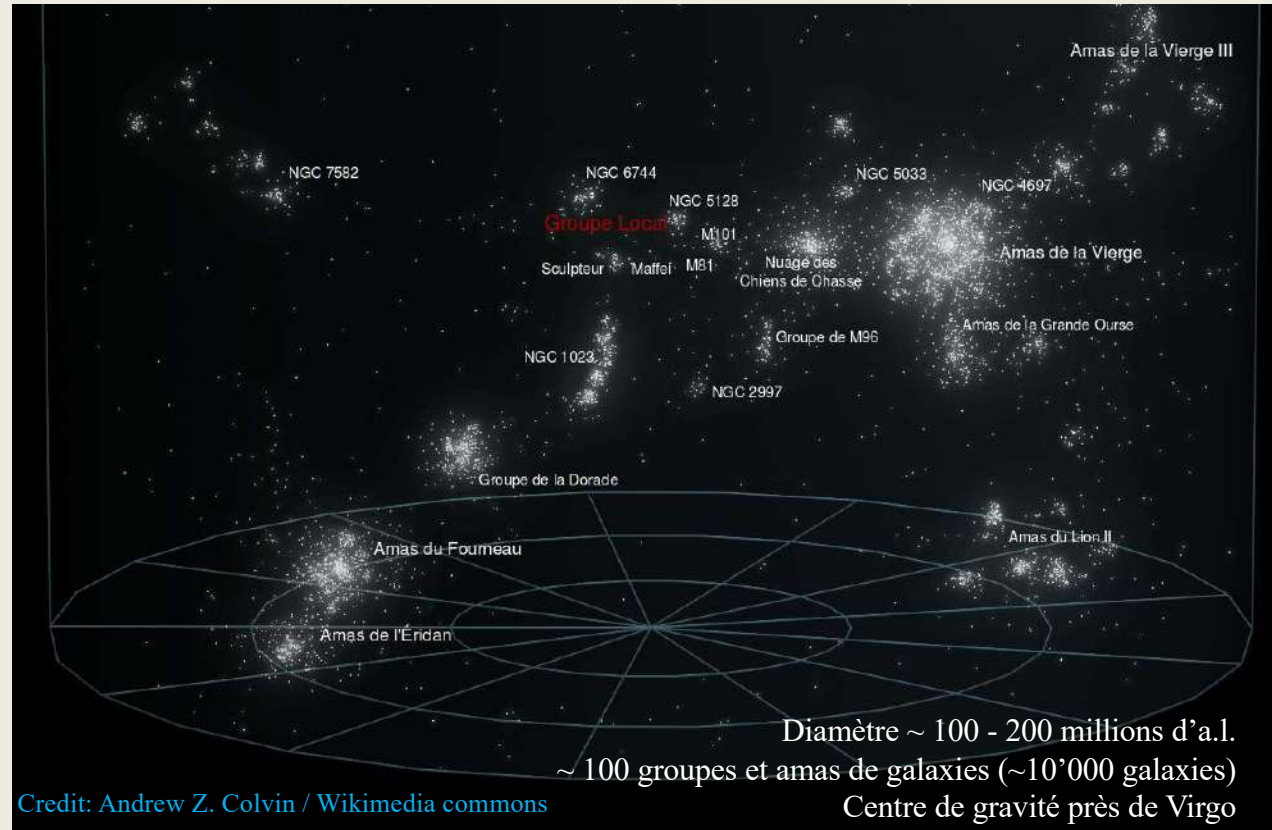
Rayon ~ 1.2 Mpc
Masse ~ $4 \times 10^{12} M_{\odot}$
Masse volumique ~ $10^{-23} \text{ kg.m}^{-3}$



Dans $\sim 2 \times 10^{12}$ années (2000 milliards d'années)

Expansion

- Le décalage spectral sera tel que même les rayons gamma qu'ils émettent auront des longueurs d'onde supérieures à la taille de l'univers observable de l'époque.
- Ces galaxies et les galaxies plus lointaines ne seront plus détectables.



C'est à l'échelle du superamas que l'expansion de l'univers commence à se faire sentir par rapport à la force gravitationnelle qui lie les amas entre eux.

e.g. Virgo s'éloigne du Groupe Local à $1250 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$, l'amas Coma à $6700 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$

Les amas s'éloignent les uns des autres et la taille des superamas augmente dans le temps

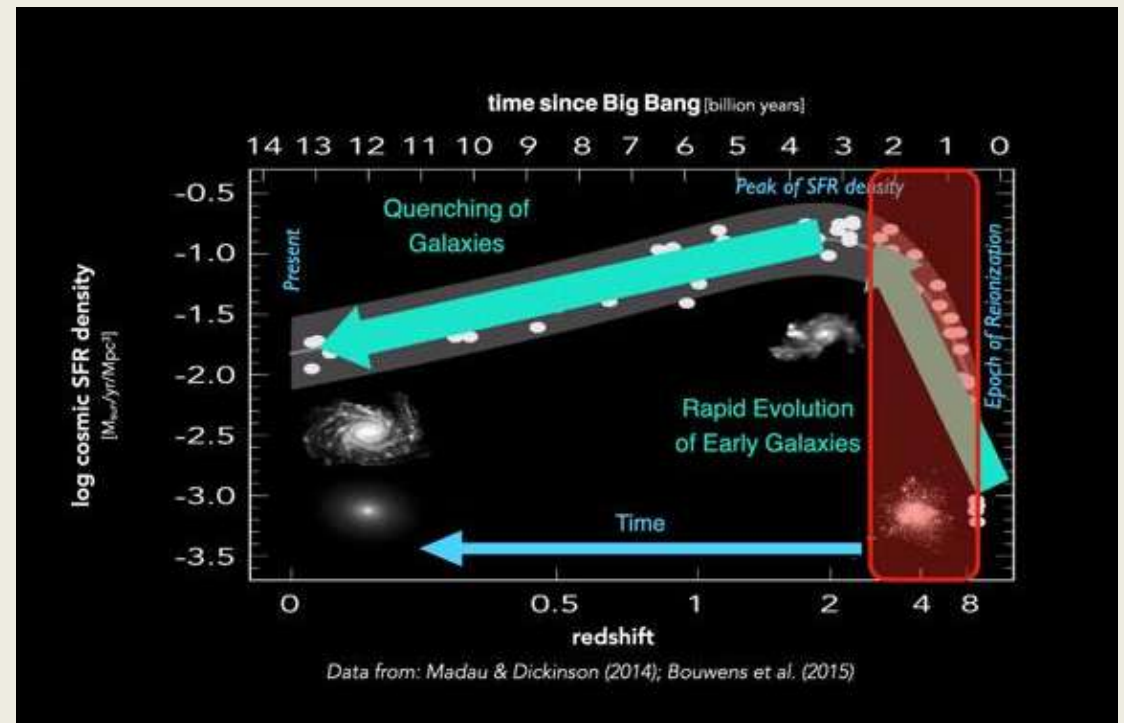
Futur des galaxies Fin de la formation de nouvelles étoiles

Temps de déplétion du gaz dans une galaxie

$$\tau_R \equiv \frac{M_{\text{gas}}}{SFR} \cdot$$

avec SFR: Star Formation Rate

→ 120 à 350 milliards d'années pour galaxie comme la Voie Lactée



Temps de déplétion du gaz dans une galaxie

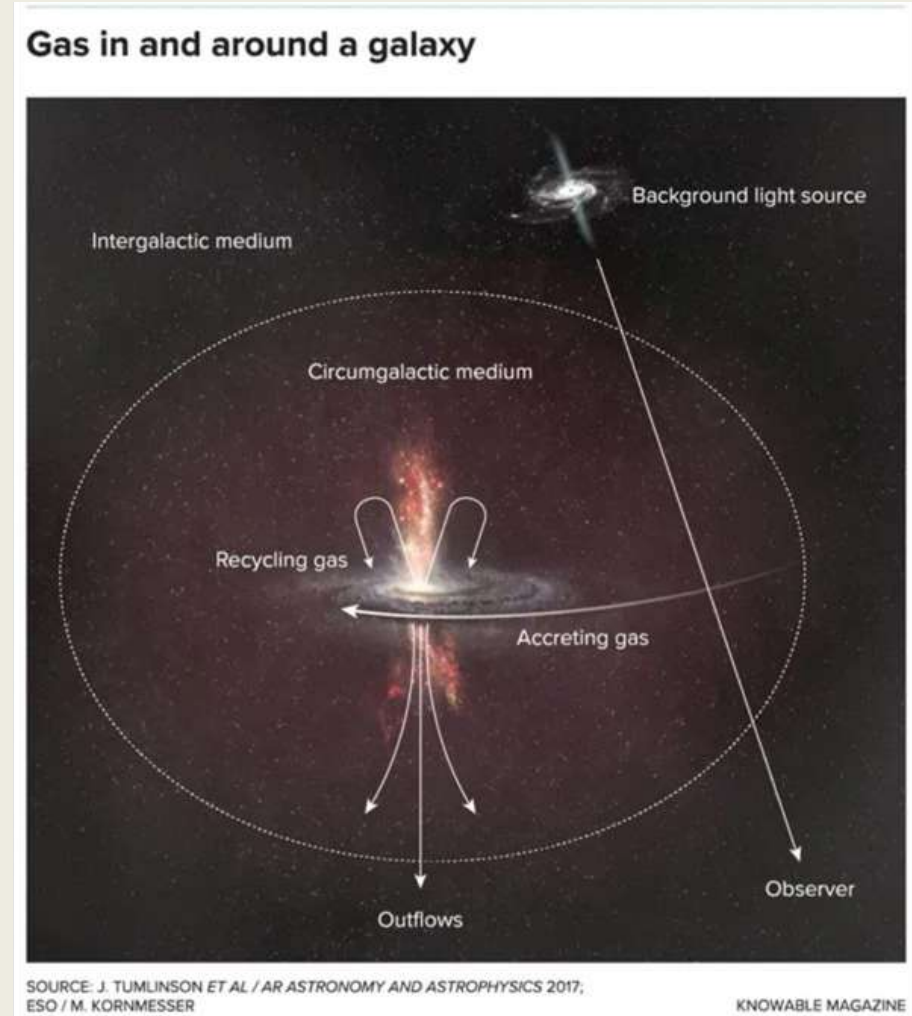
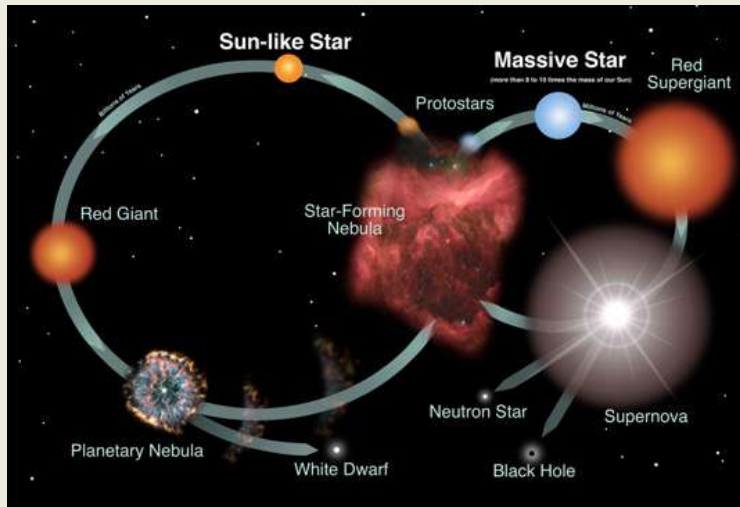
$$\tau_R \equiv \frac{M_{\text{gas}}}{SFR}$$

avec SFR: Star Formation Rate

→ 120 à 350 milliards d'années pour galaxie comme la Voie Lactée

Ejection de gaz stellaire, accréition de gaz

→ **10¹² à 10¹⁴ années (1000 à 100'000 milliards d'années)**



Le temps de vie d'une étoile dépend de sa masse

$$\tau_* = 10^{10} \text{ yr} \left[\frac{M_*}{1 M_\odot} \right]^{-\alpha},$$

avec $\alpha \approx 2.5 - 3$ pour les étoiles de petites masses.

- ~ 12 - 20 milliards d'années pour une étoile de $0.8 M_\odot$
- **~ 20'000 milliards d'années pour une étoile de $0.08 M_\odot$**

La grande majorité des étoiles ont une masse inférieure à $0.8 M_\odot$

$$f \equiv \frac{\int_{M_{\min}}^{0.8} (dN/dm) dm}{\int_{M_{\min}}^{M_{\max}} (dN/dm) dm} \sim 80\%,$$

- Pendant ce temps, la luminosité des galaxies restera similaire à leur luminosité actuelle $L_{\text{gal}} \sim \text{qq } 10^{10} L_\odot$

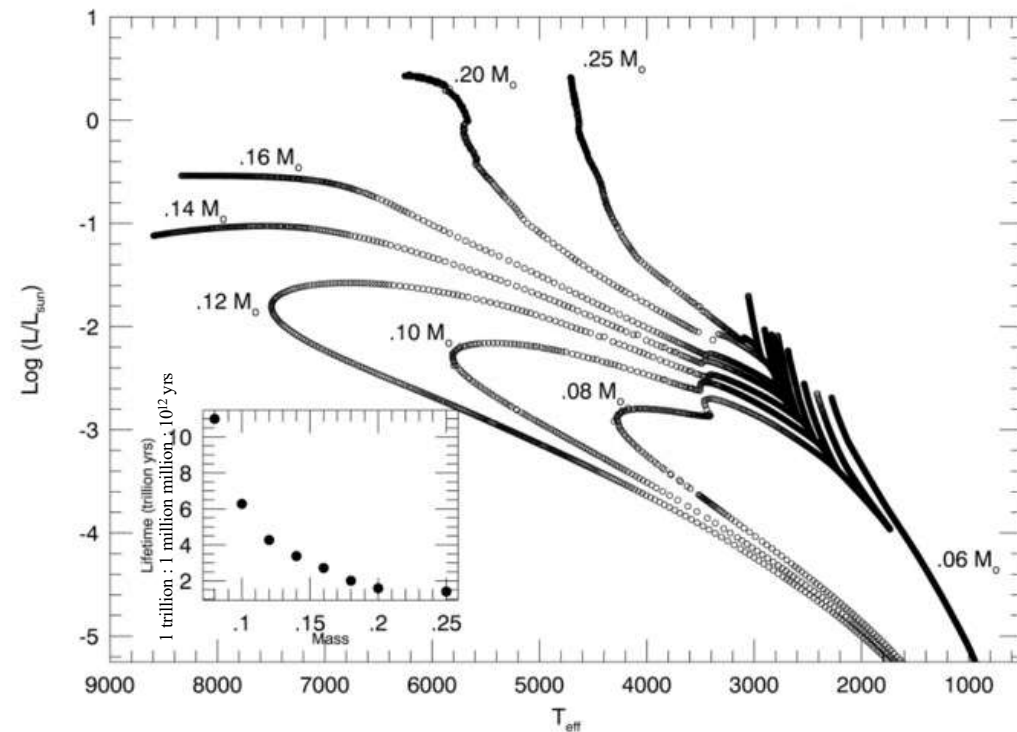
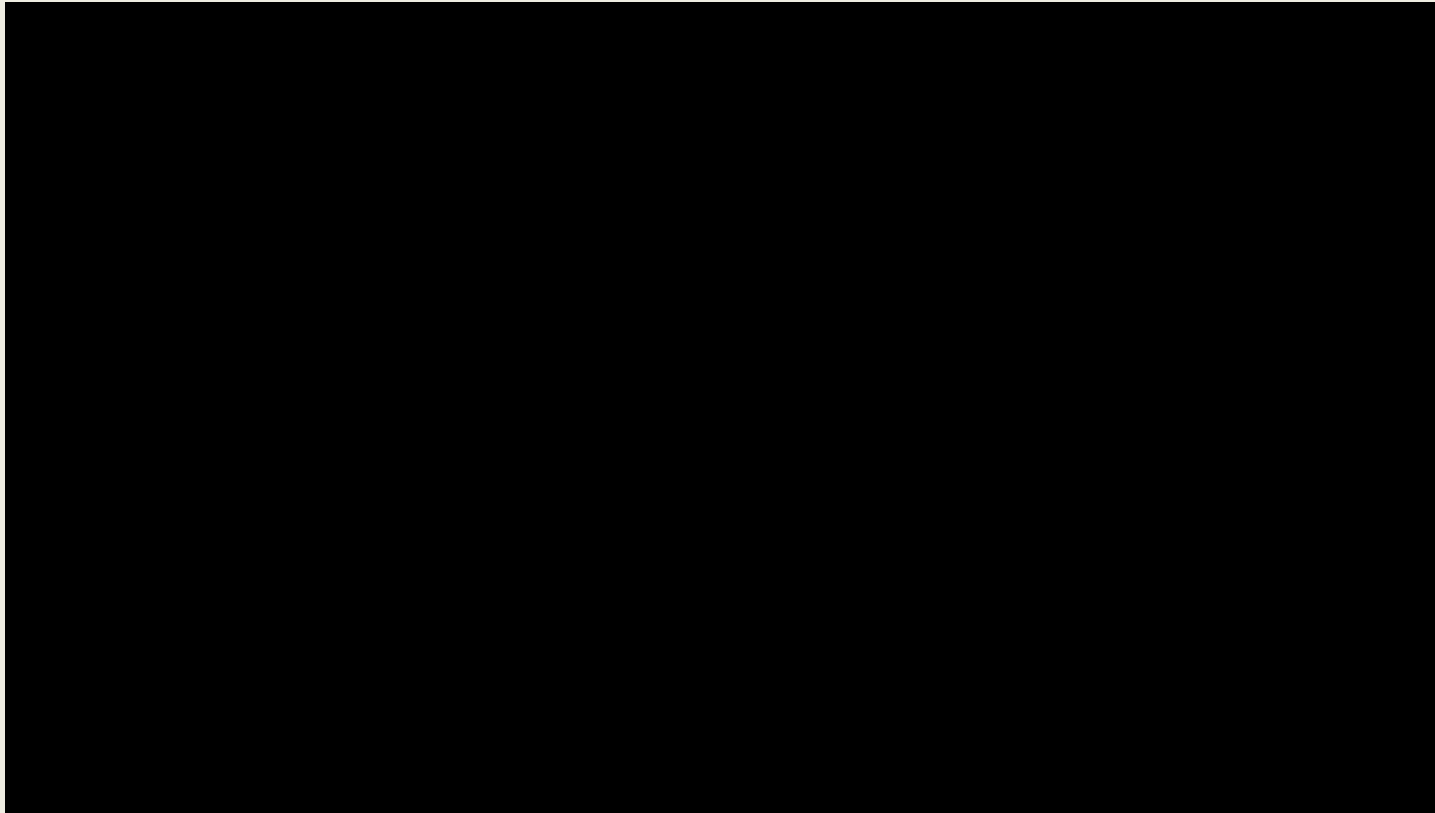


Fig. 2. The H-R diagram for red dwarfs with masses in the range $M_* = 0.08 - 0.25 M_\odot$ (from LBA97). Stars with mass $M_* = 0.25 M_\odot$ are the least massive stars that can become red giants. The inset diagram shows the hydrogen burning lifetime as a function of stellar mass. Note that these small stars live for trillions of years.

Futur de l'Univers

Jusqu'à la fin de l'ère stellaire ($\sim 10^4$ à 10^5 milliards d'années)



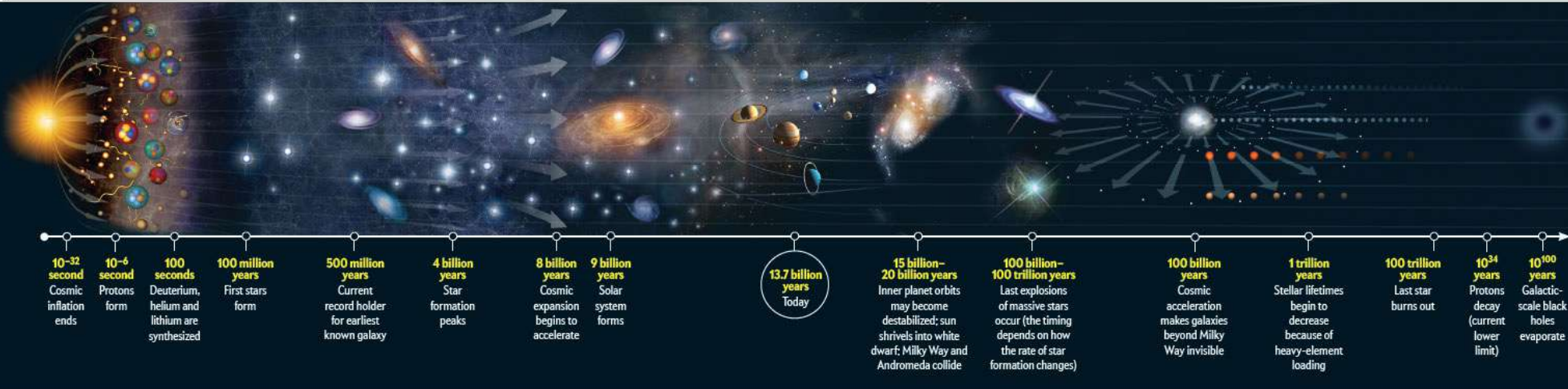
Futur de l'Univers

Ère de la dégénérescence [10^{15} à 10^{30} ans] – Life in the dark

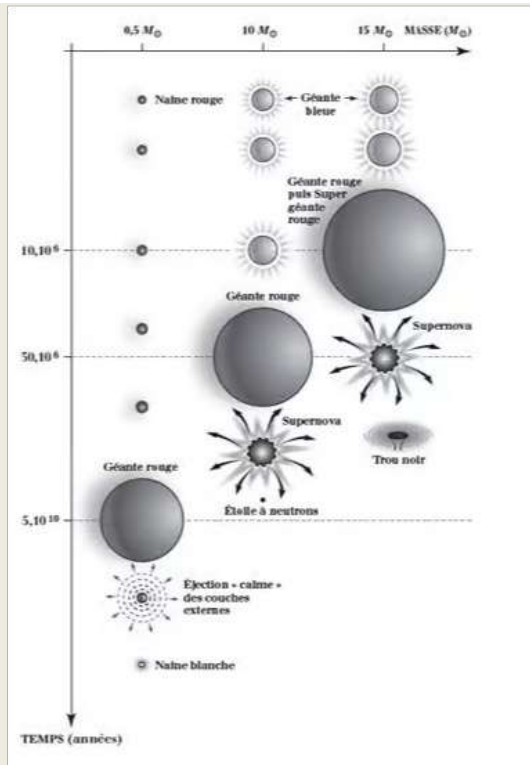
COSMIC HISTORY

Dawn to Dusk

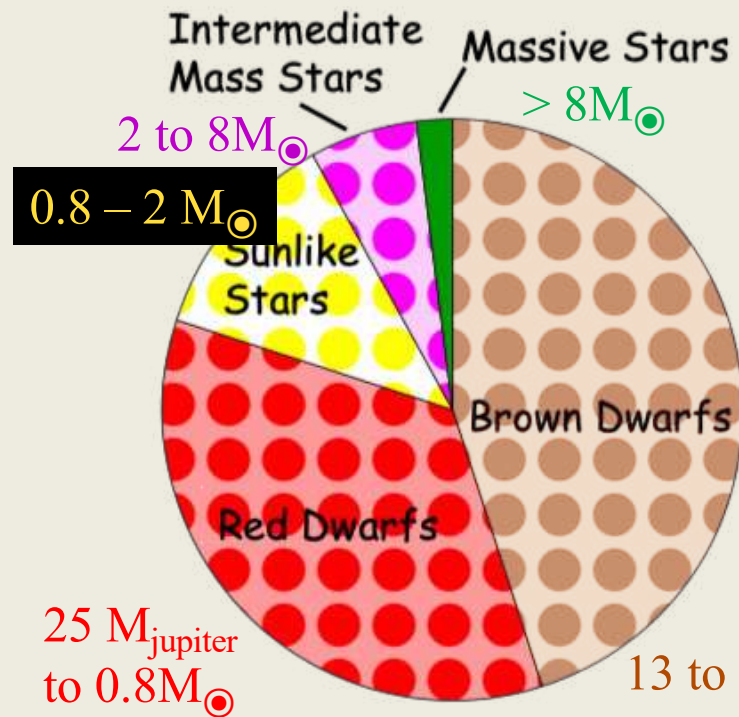
After the furies of birth, the mature cosmos now evolves more slowly. Stars will continue to form for as long as another 100 trillion years (about 10,000 times the present age of the universe), which leaves plenty of time for slow-building cosmic phenomena to occur.



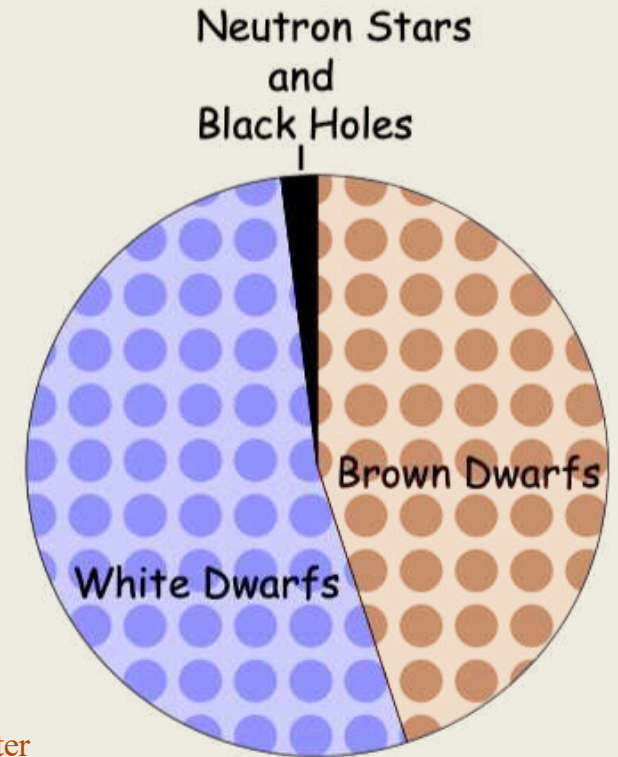
Timeline not to scale



Futur des galaxies Nature des résidus d'étoiles



Initial Makeup of Stars

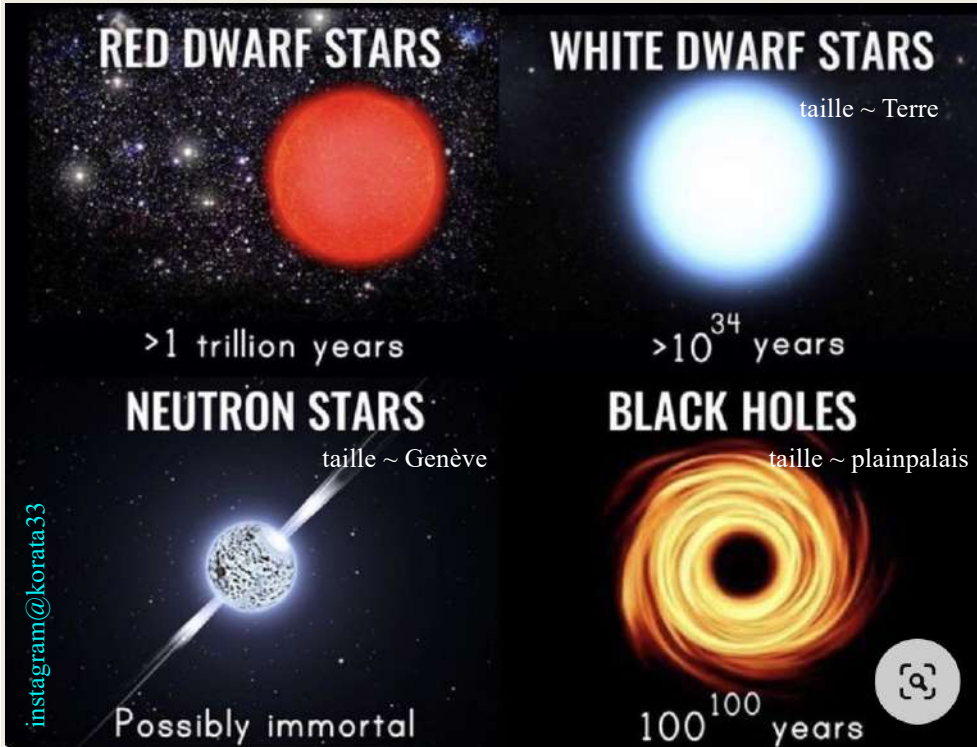


Final Makeup of Stars

Crédit: F.X.Timmes

En nombre : 45 % naines brunes – 55 % naines blanches – 0.26 % étoiles à neutrons
 En masse : 9.7 % naines brunes – 88 % naines blanches – 2.4 % étoiles à neutrons

Nature des résidus d'étoiles



BH-BH
GW190521 (VIRGO Italie –LIGO USA)
BH(85M_⊙)-BH(66M_⊙) → BH(142M_⊙)

Futur de l'Univers

Ère de la dégénérescence [$> 10^{15}$ ans] – Life in the dark

Systèmes multiples, collisions, fusions

WD-WD → SNeIa

NS-NS → NS ou BH

→ short gamma-ray bursts, kilonovae

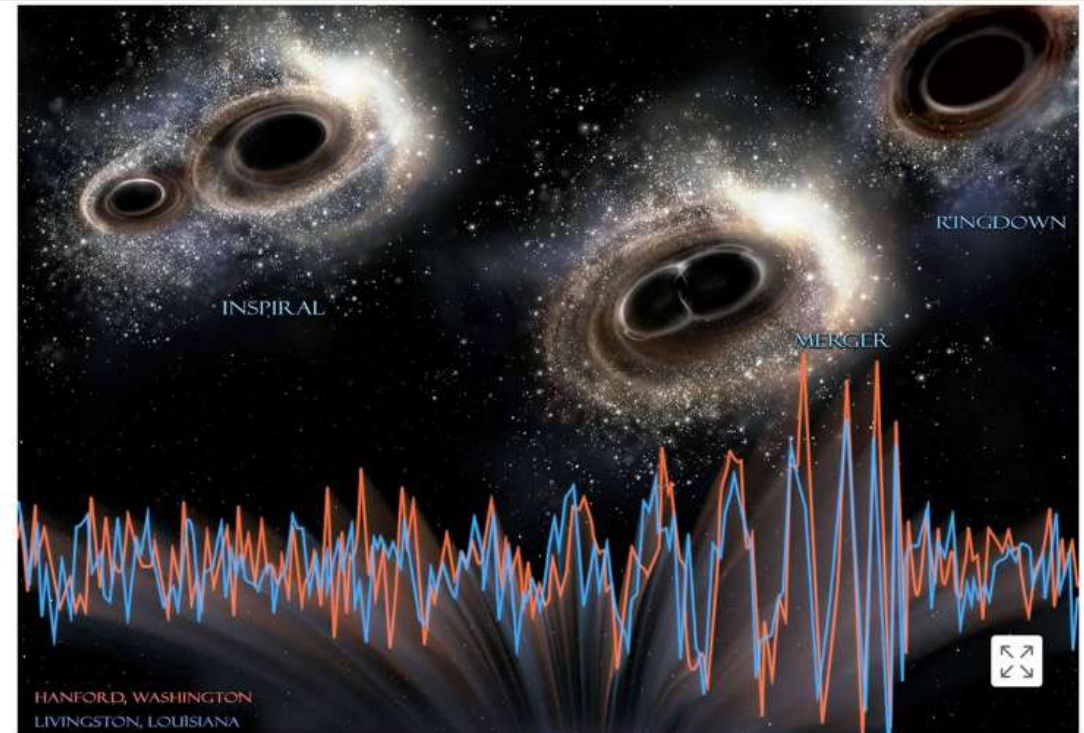
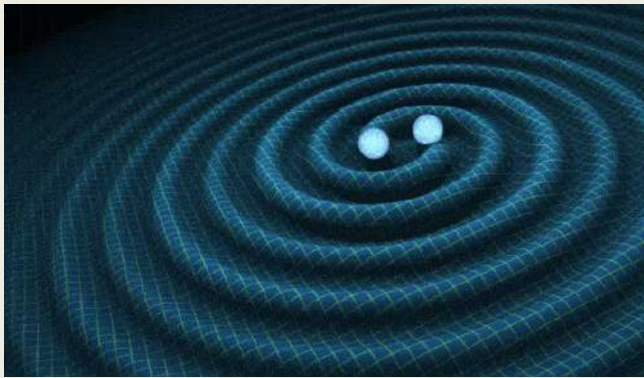


[Crédit: ESO University of Warwick/Mark Garlick](#)



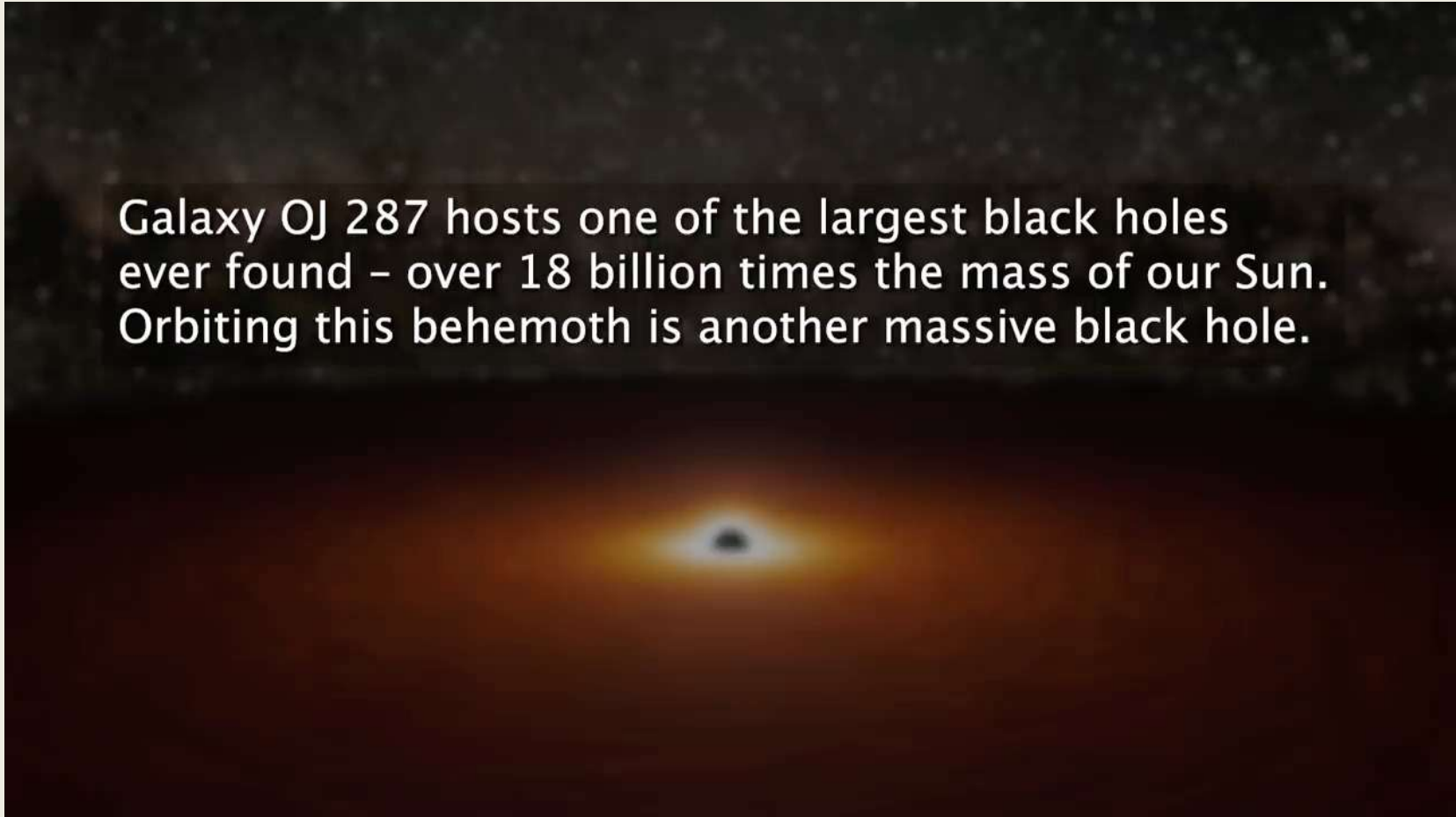
Mark Myers, ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery (OzGrav)

Futur de l'Univers
Ère de la dégénérescence [$> 10^{15}$ ans] – Life in the dark

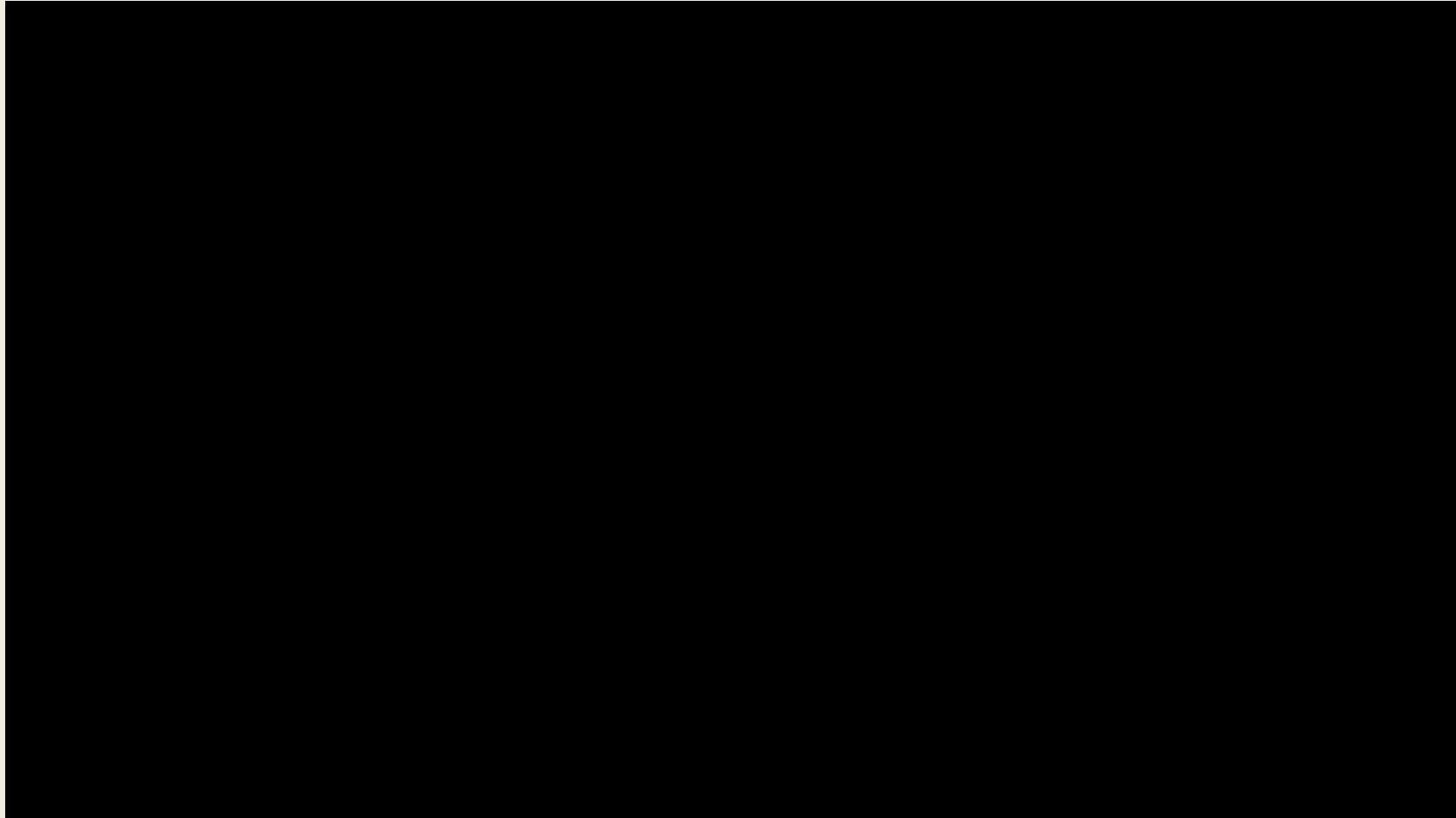


INSPIRAL, MERGER, RINGDOWN: CE SONT LES NOMS ANGLAIS DES TROIS ÉTAPES QUI ONT CONDUIT DEUX TROUS NOIRS À SE RAPPROCHER EN DÉCRIVANT UNE SPIRALE À LA SUITE DES PERTES D'ÉNERGIES SOUS FORME D'ONDES GRAVITATIONNELLES, PUIS À ENTRER EN COLLISION POUR FINALEMENT DONNER UN SEUL TROU NOIR. L'HORIZON DES ÉVÈNEMENTS DE L'OBJET COMPACT FINAL A VIBRÉ, TELLE UNE CLOCHE FRAPPÉE, EN ÉMETTANT DES ONDES GRAVITATIONNELLES. L'ÉVÈNEMENT A DURÉ MOINS D'UNE SECONDE. LES COURBES MONTRENT LES SIGNAUX DÉTECTÉS PAR LES DEUX INTERFÉROMÈTRES LIGO, À HANFORD, ET À LIVINGSTON, AUX ÉTATS-UNIS, LE 14 SEPTEMBRE 2015 ET ELLES SONT EN CORRESPONDANCE AVEC LA CHRONOLOGIE DES ÉVÈNEMENTS. © LIGO, NSF, AURORE SIMONNET

Galaxy OJ 287 hosts one of the largest black holes ever found – over 18 billion times the mass of our Sun. Orbiting this behemoth is another massive black hole.



The new simulation shows three orbits of a pair of supermassive black holes only 40 orbits from merging. The models reveal the light emitted at this stage of the process may be dominated by UV light with some high-energy X-rays, similar to what's seen in any galaxy with a well-fed supermassive black hole.



<https://svs.gsfc.nasa.gov/13043>

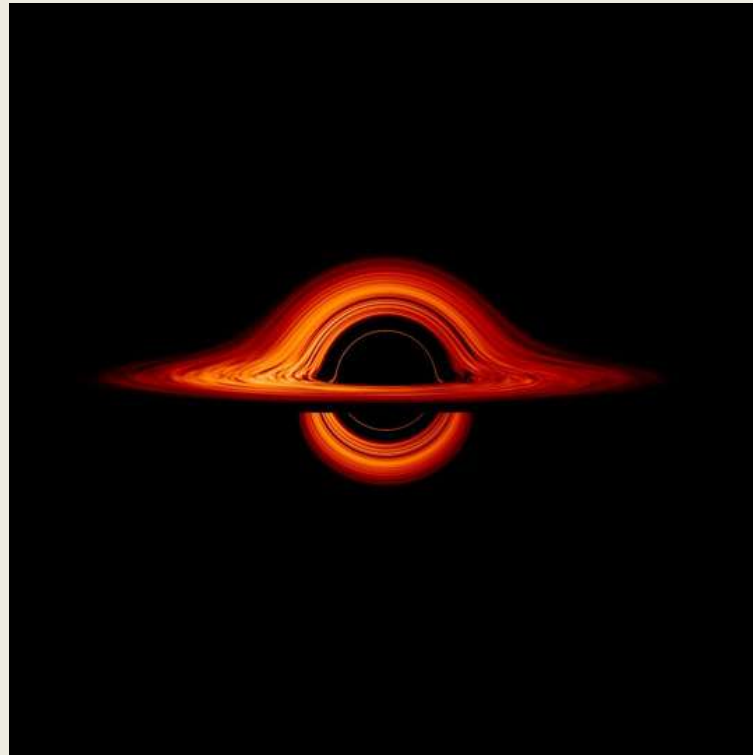
NASA's Goddard Space Flight Center/Scott Noble; simulation data, d'Ascoli et al. 2018

Futur de l'Univers Ère de la dégénérescence [10^{19} à 10^{20} ans]

Systemes multiples, collisions, fusions

Processus dynamiques

→ Les résidus sont éjectés hors de leur galaxie (~ 90%)
ou fusionnent dans le trou noir galactique central (~ 10%)



Futur de l'Univers Ère des trous noirs [10^{43} à 10^{110} ans]

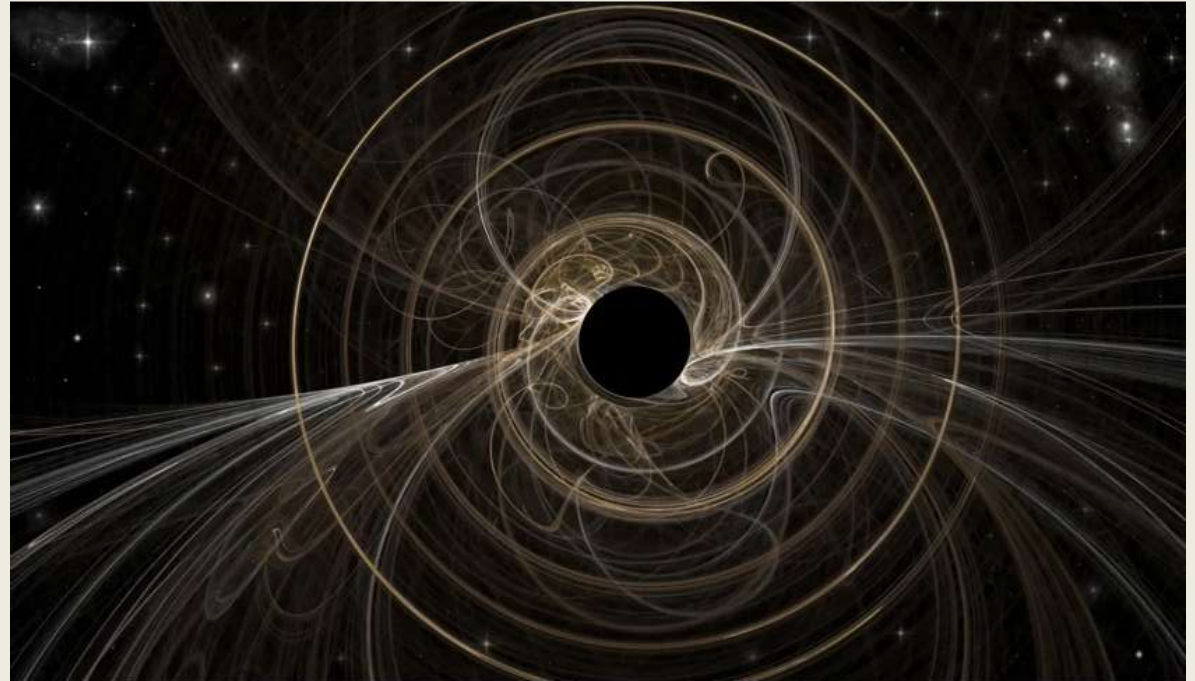
Evaporation des trous noirs par effets quantiques
(rayonnement de Hawking: photons, gravitons, neutrinos, puis quarks, muons)

$$t_e = 5120\pi \frac{G^2}{c^4 \hbar} M^3$$

$$\frac{t_e}{1 \text{ s}} = 6,6 \times 10^{74} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^3$$

Trous noirs de masse stellaire $\sim 10^{65}$ ans

Trous noirs supermassifs $\sim 10^{110}$ ans



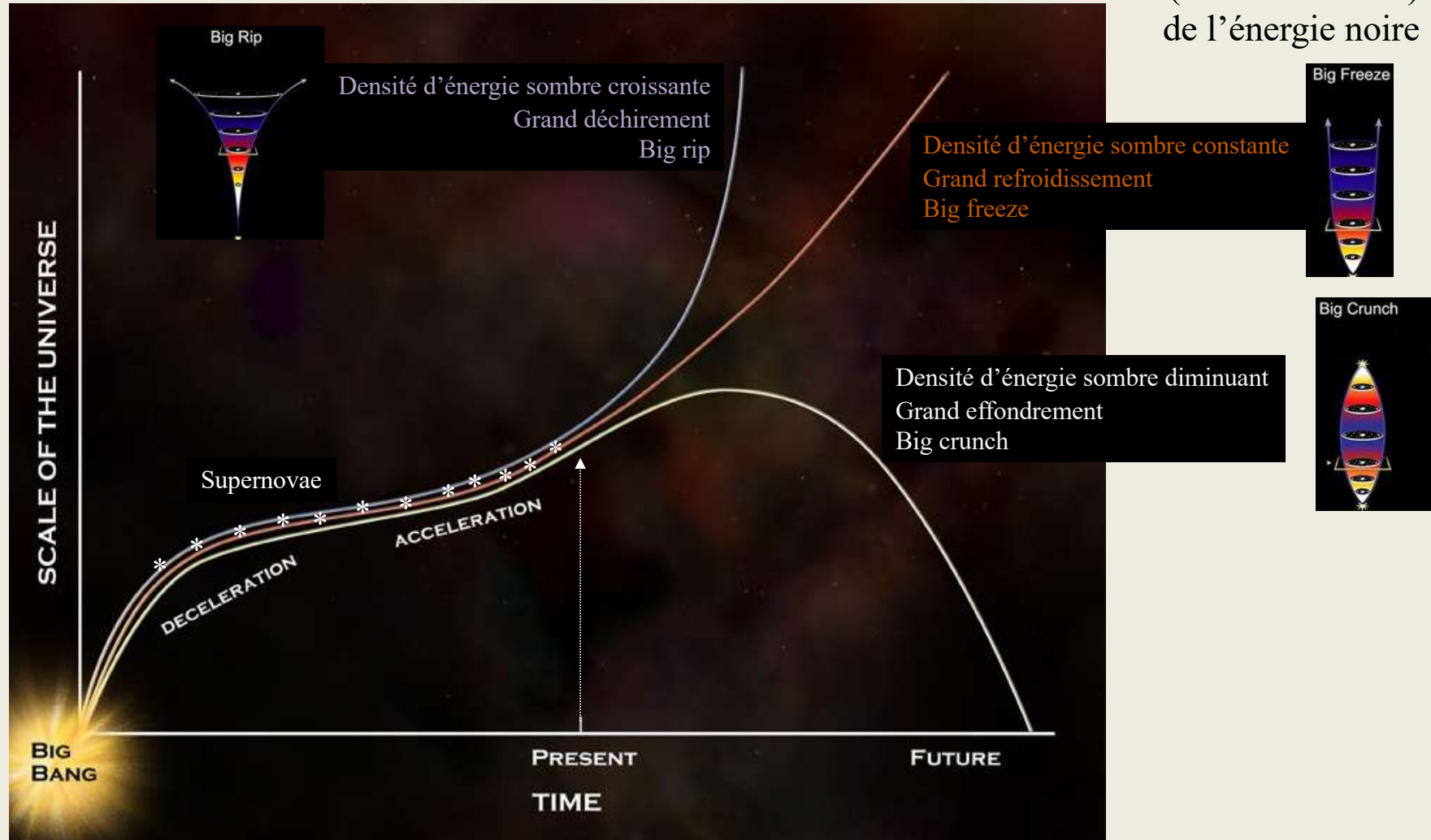
Futur de l'Univers Ère sombre [10^{43} à 10^{110} ans]

Matière noire, photons, baryons, neutrinos, électrons
Matière diffuse, énergie très faible, temps caractéristiques infinis
Annihilation de la matière

La chronologie décrite fait l'hypothèse que le proton se désintègre (demi-vie $> 10^{35}$ (- 10^{38}) ans)

Futur de l'Univers

Trois scénarios selon la nature (variable ou non) de l'énergie noire



Futur de l'Univers

Après la fin de l'ère stellaire ($> 10^4$ à 10^5 milliards d'années)





UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE

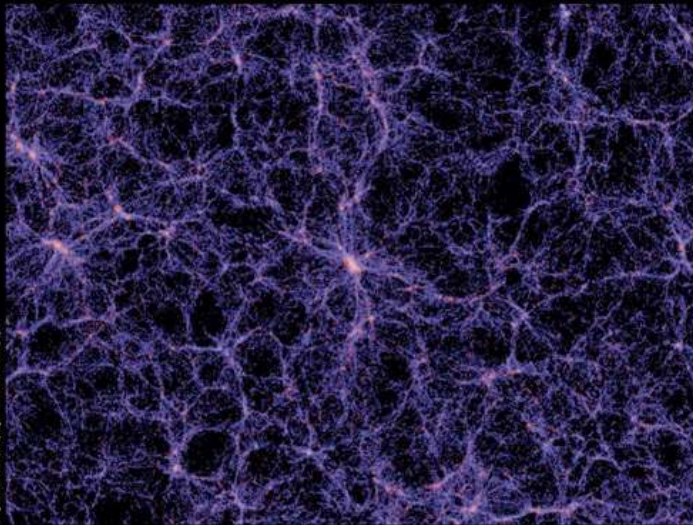


Image : Oude MMA, V. Springel/Max Planck Institute for Astrophysics

le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>



Cours 14 – 19 décembre 2023

Le futur de l'Univers

