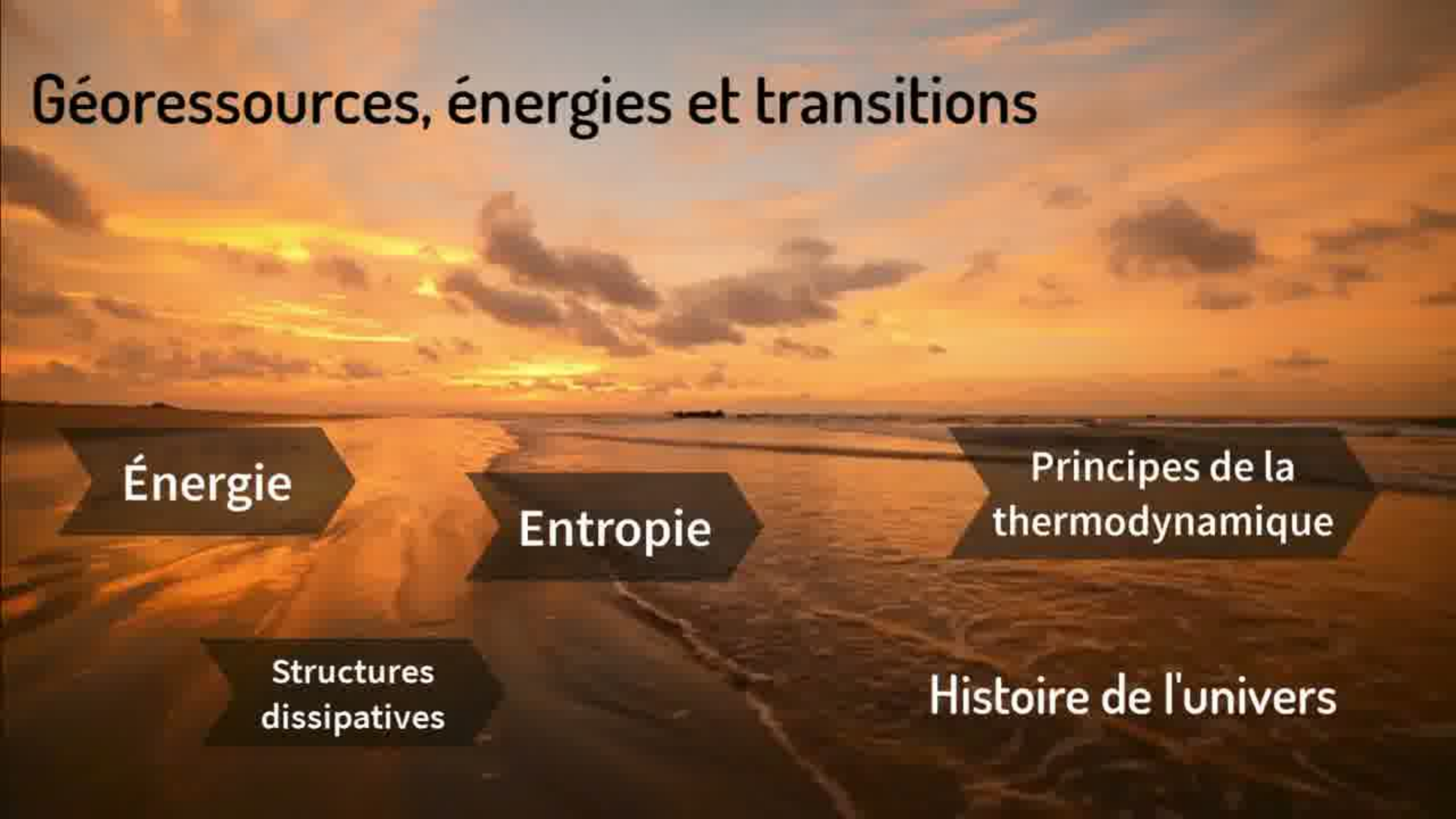


Géoressources, énergies et transitions

Histoire de l'univers

Géoressources, énergies et transitions



Énergie

Entropie

Principes de la
thermodynamique

Structures
dissipatives

Histoire de l'univers

1er principe

l'énergie se conserve

2e principe

l'énergie se dissipe

l'entropie de l'univers augmente toujours

3e principe

Principe de
production
maximale d'entropie

l'énergie se dissipe le plus vite
possible, compte tenu des contraintes



Le scénario global de l'évolution de
l'univers depuis le Big Bang jusqu'à nous

Eric Chaisson

2 Non-equilibrium Thermodynamics in an Energy-Rich Universe

Eric J. Chaisson

Wright Center & Physics Department, Tufts University, Medford, MA 02155,
USA.

Summary. Free energy, the ability to do work, is the most universal currency known in the natural sciences. In an expanding, non-equilibrated Universe, it is free energy that drives order from disorder, from big bang to humankind, in good accord with the second law of thermodynamics and leading to the production of entropy. On all scales, from galaxies and stars to planets and life, the rise of complexity over the course of natural history can be uniformly quantified by analyzing the normalized flow of energy through open, non-equilibrium, thermodynamic systems.

COSMIC EVOLUTION

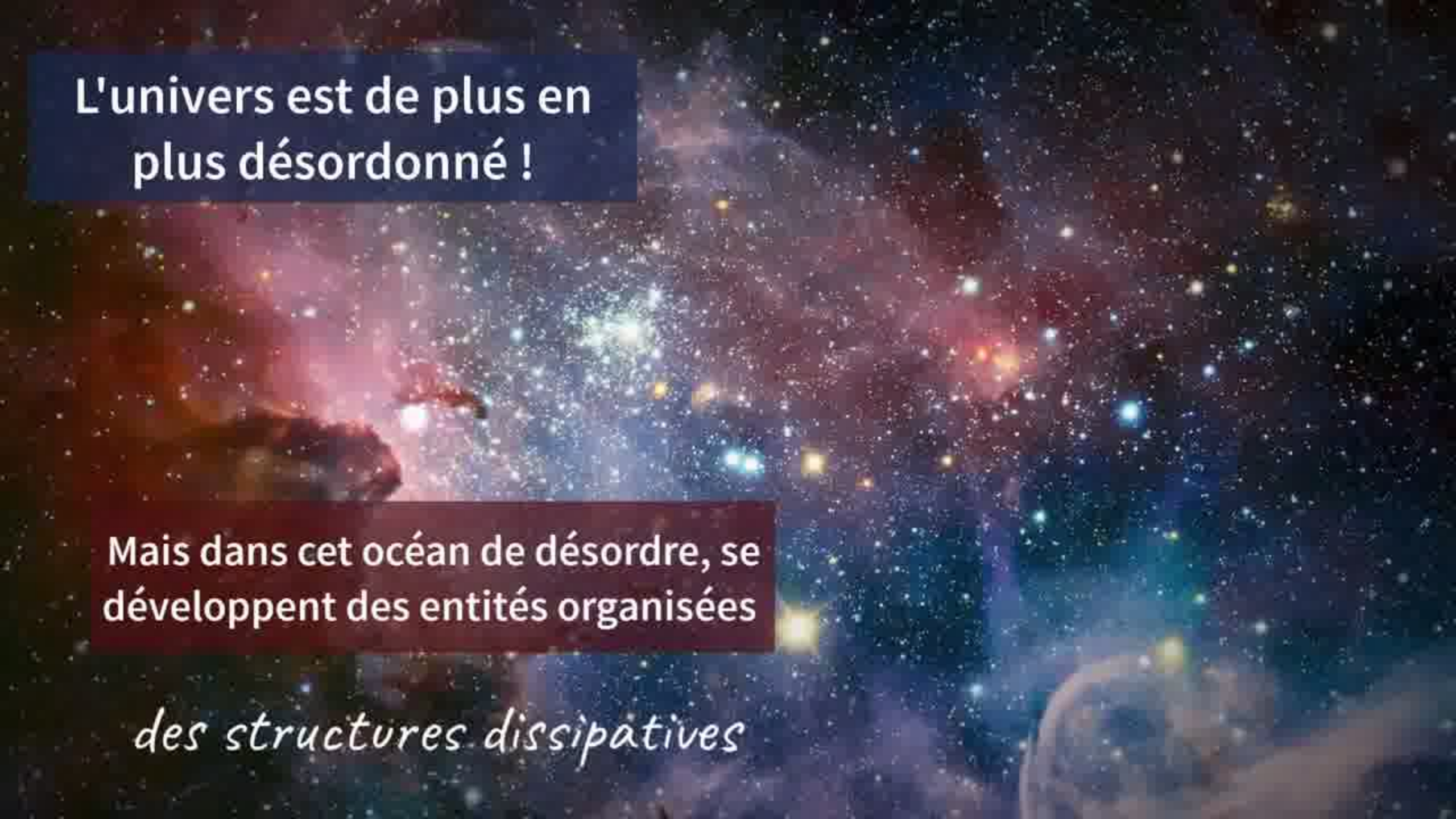


The Rise of Complexity
in Nature

ERIC J. CHAISSON



HARVARD
UNIVERSITY



L'univers est de plus en plus désordonné !

Mais dans cet océan de désordre, se développent des entités organisées

des structures dissipatives



L'univers est de plus en plus désordonné !

Entropie
très élevée

Mais dans cet océan de désordre, se développent des entités organisées

des structures dissipatives

Faible
entropie

1) Les structures dissipatives sont de grandes consommatrices d'énergie

A photograph of a volcanic eruption at night. A dark, silhouetted mountain peak is in the foreground. A massive, bright orange and yellow plume of lava or smoke rises vertically from the crater, dominating the center of the frame. The background is a deep blue night sky with some faint stars visible.

1) Les structures dissipatives sont de grandes consommatrices d'énergie

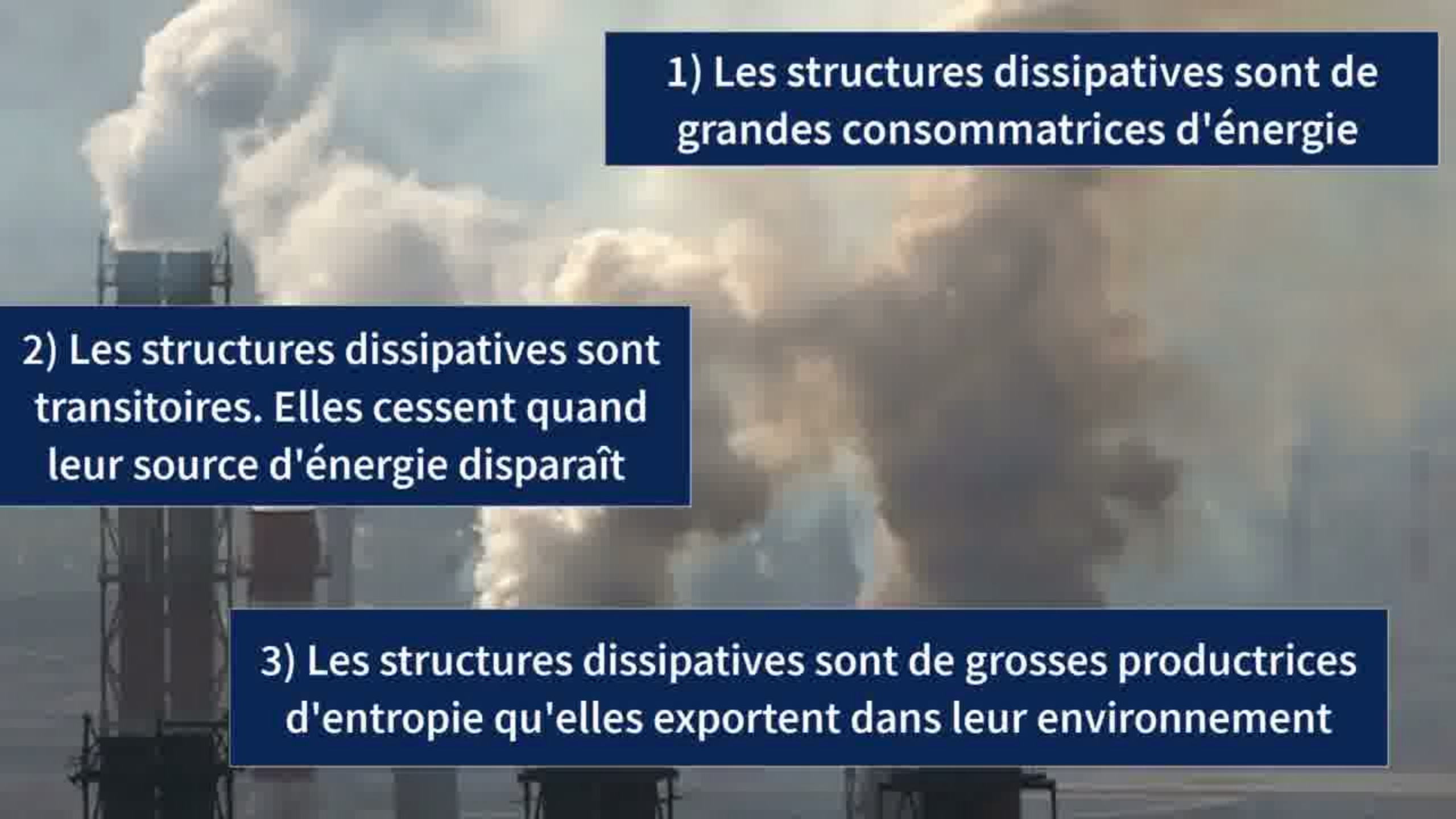
2) Les structures dissipatives sont transitoires. Elles cessent quand leur source d'énergie disparaît

A photograph of a volcanic eruption. A large, bright orange and yellow plume of lava and ash rises from a dark, rocky volcano into a clear blue sky. The lava flow is thick and turbulent, with sparks and smaller droplets visible at its base. The overall scene is dramatic and powerful, illustrating the concept of a dissipative structure.

1) Les structures dissipatives sont de grandes consommatrices d'énergie

2) Les structures dissipatives sont transitoires. Elles cessent quand leur source d'énergie disparaît

3) Les structures dissipatives sont de grosses productrices d'entropie qu'elles exportent dans leur environnement

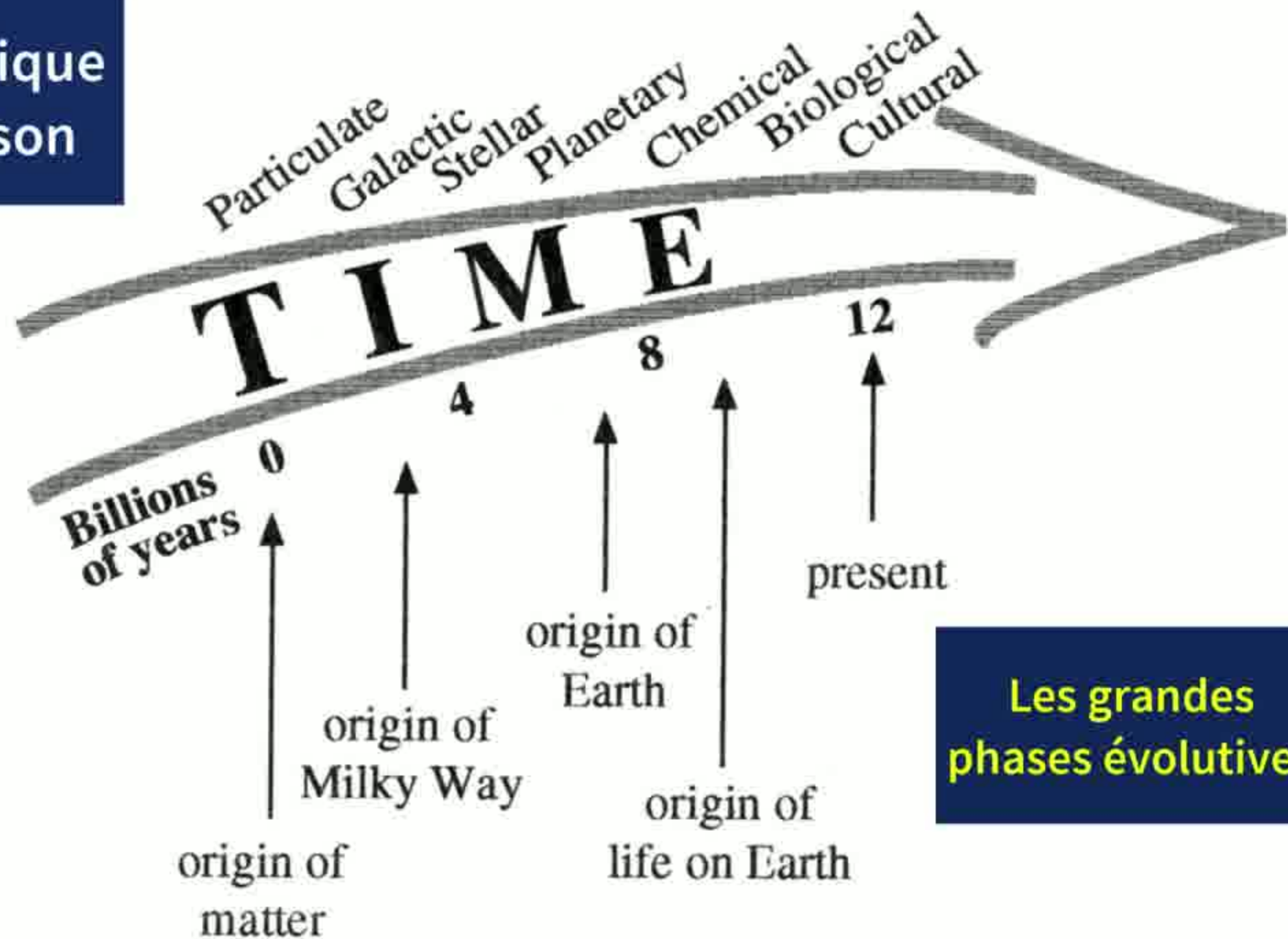


1) Les structures dissipatives sont de grandes consommatrices d'énergie

2) Les structures dissipatives sont transitoires. Elles cessent quand leur source d'énergie disparaît

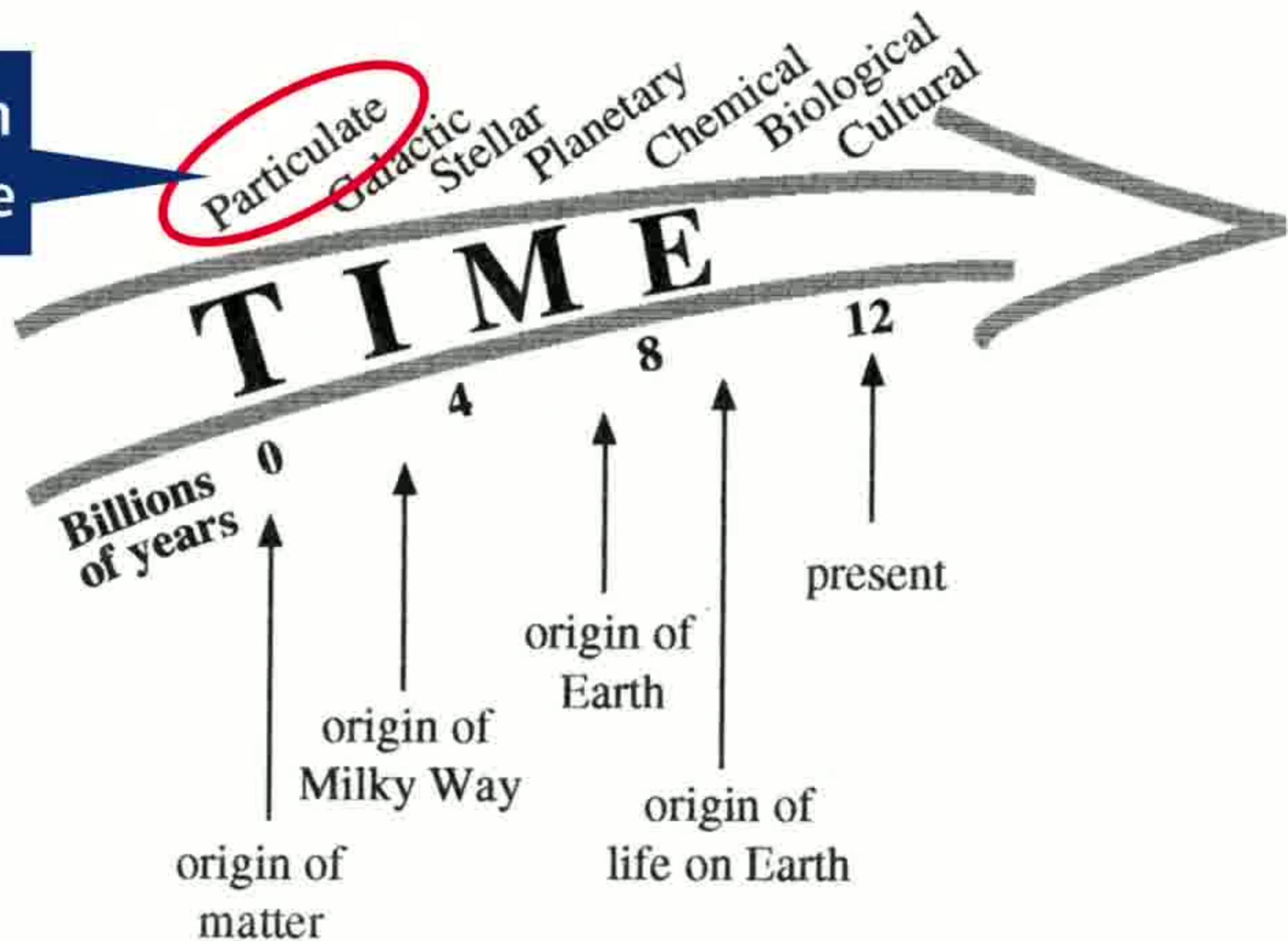
3) Les structures dissipatives sont de grosses productrices d'entropie qu'elles exportent dans leur environnement

L'histoire cosmique vue par Chaisson



**Les grandes
phases évolutives**

La formation de la matière



Au début, la matière
n'existe pas !



The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of temperature variations across the sky. The colors range from deep purple and blue (cooler regions) to bright yellow and orange (warmer regions), with a central white area representing the highest temperatures. The pattern consists of numerous small-scale fluctuations and larger-scale structures, characteristic of the early universe's density distribution.

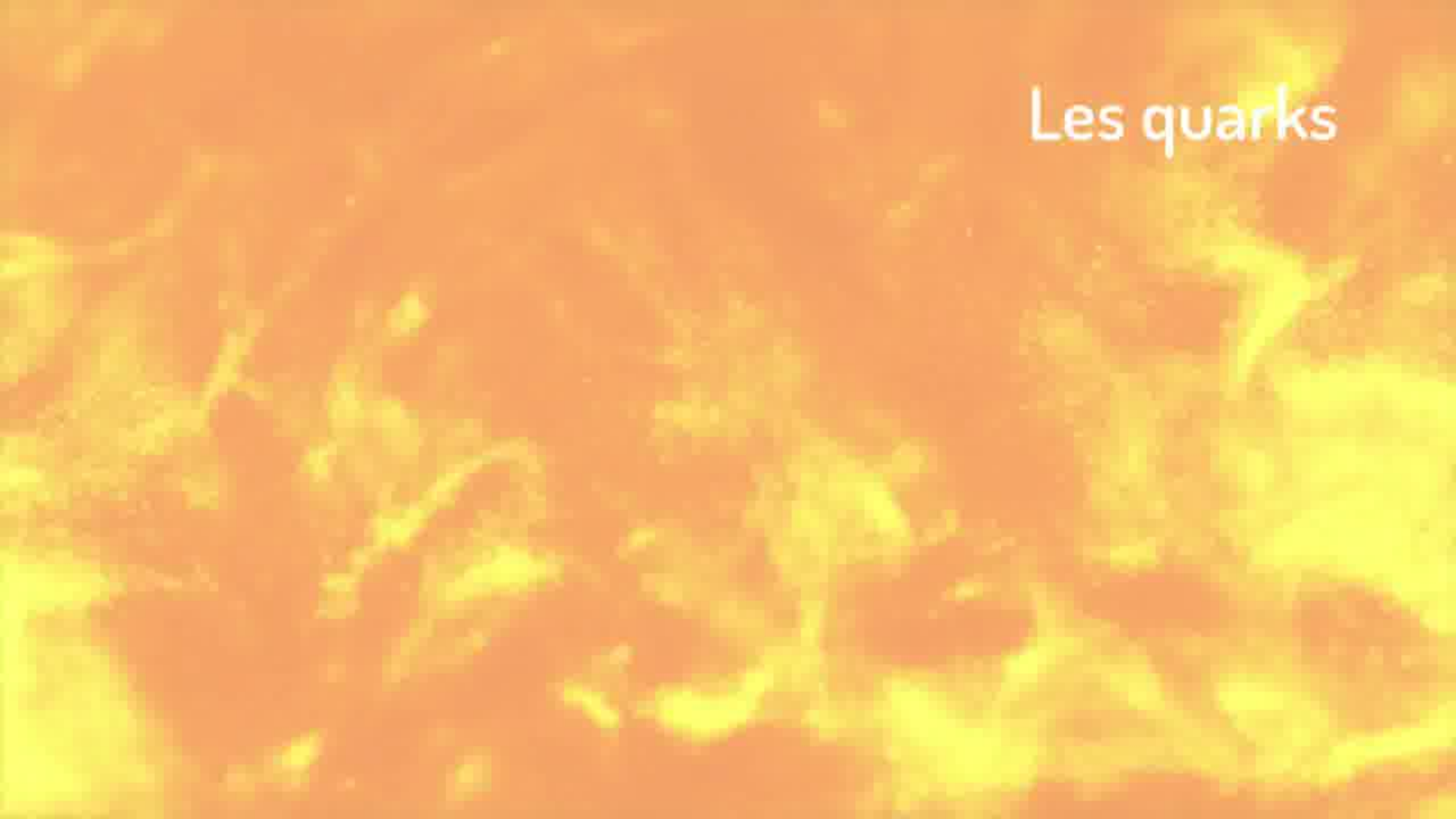
Refroidissement

Expansion (inflation
cosmique)

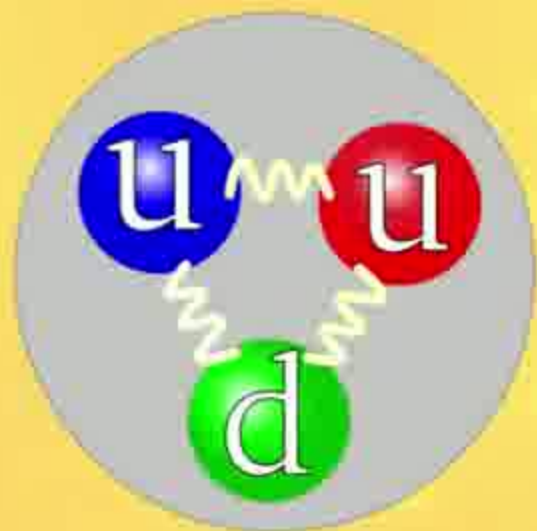
Formation de
particules
élémentaires

Les quarks

Les quarks



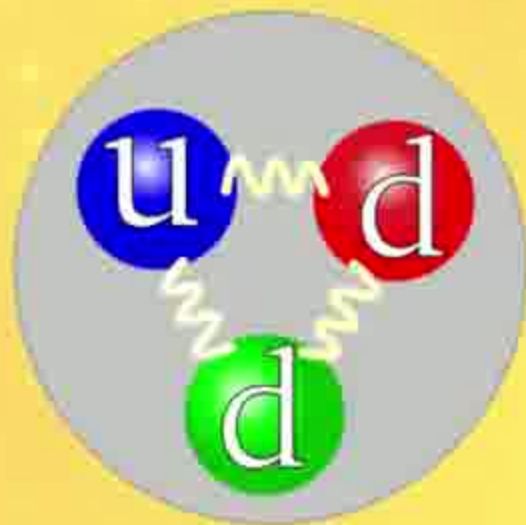
Un proton



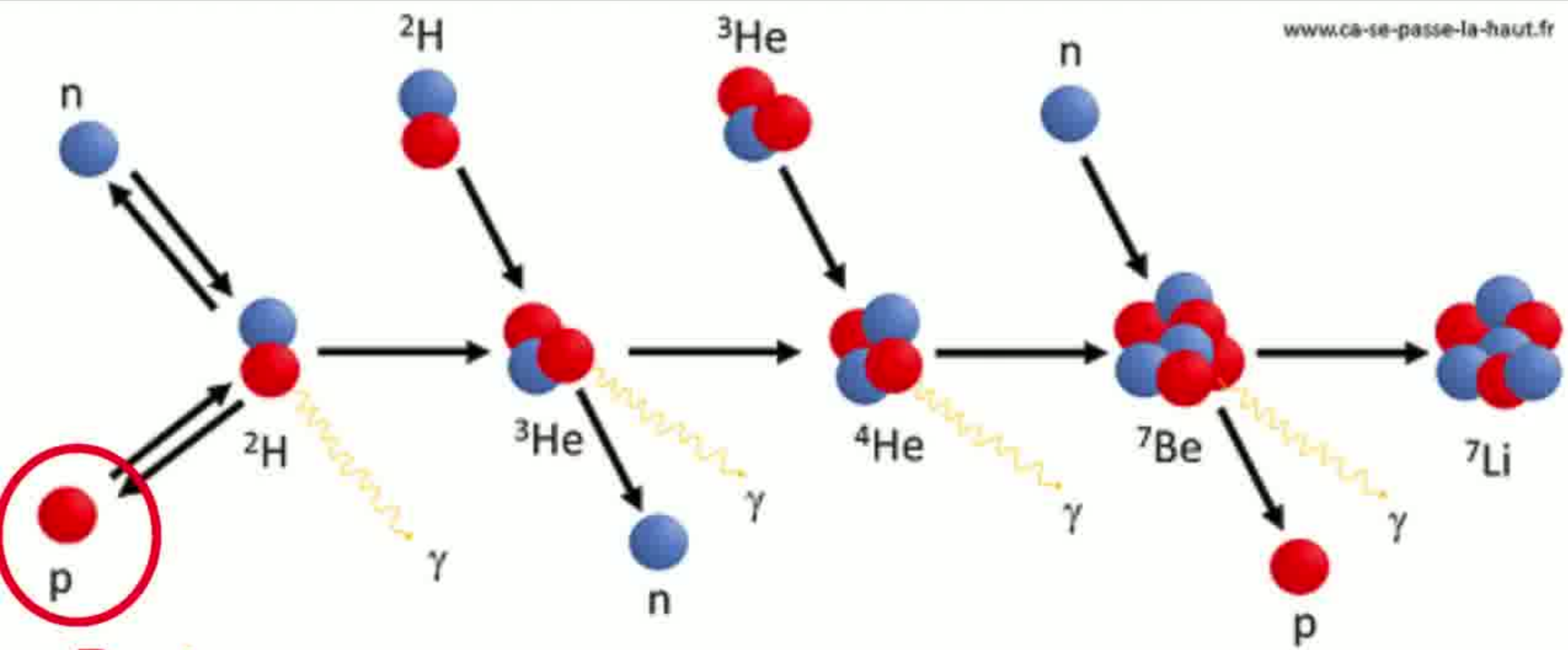
= un noyau d'hydrogène

2 quarks 'up' +
1 quark 'down'

Un neutron

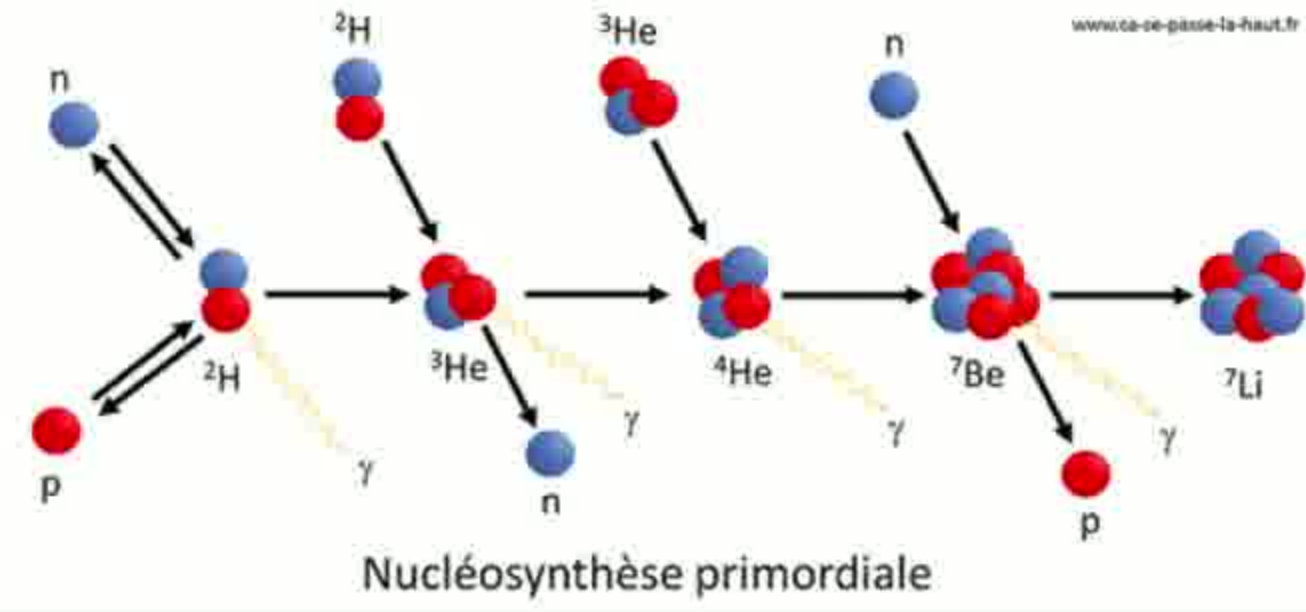


1 quark 'up' +
2 quarks 'down'

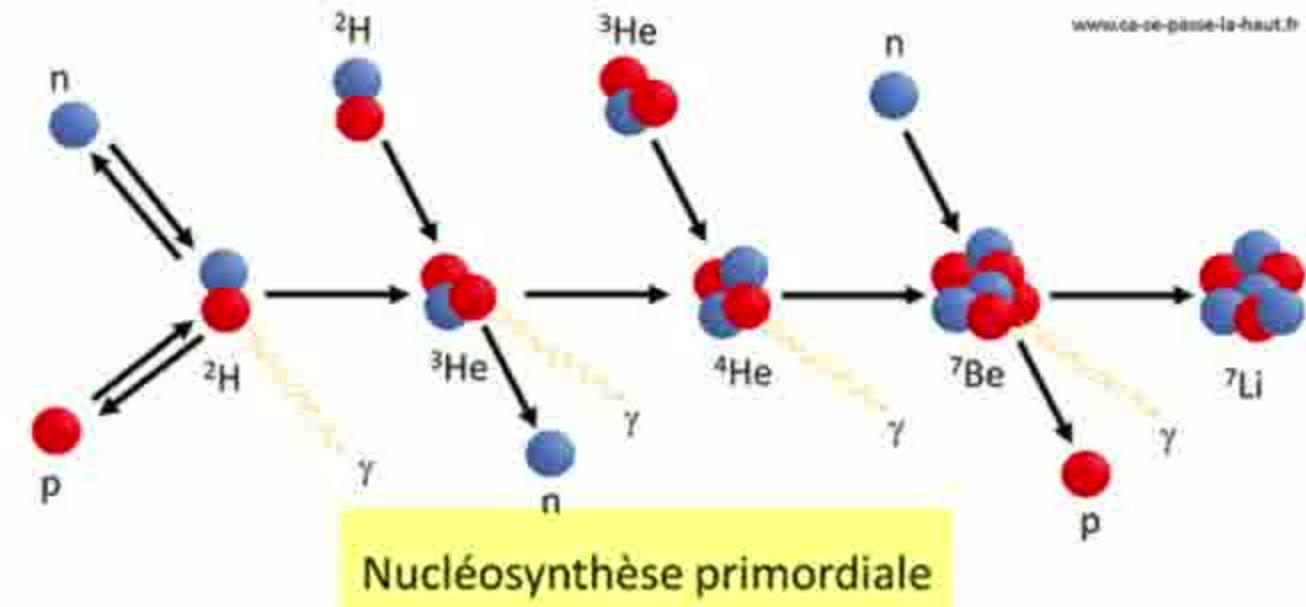


Proton

Nucléosynthèse primordiale



Un noyau d'hélium pour
12 noyaux d'hydrogène

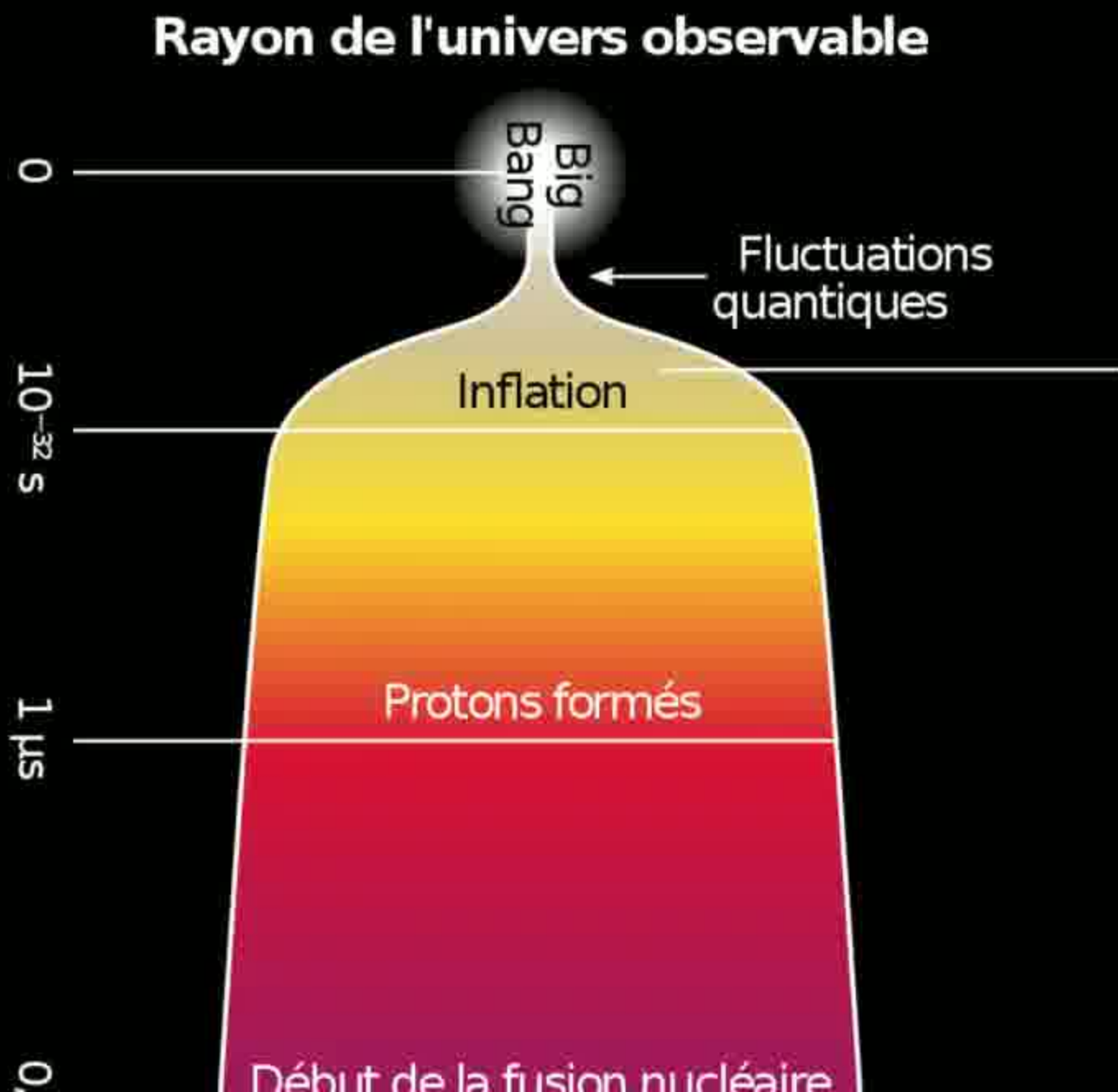


Un noyau d'hélium pour
12 noyaux d'hydrogène

Composition de
l'univers primordial,
trois minutes après le
Big Bang

En masse, 25 % poids d'hélium et
75 % poids d'hydrogène

Histoire de l'Univers juste après le Big Bang



Nucléosynthèse
primordiale

Âge de l'Univers

s

3 min

380 000 ans

13,8

Fin de la fusion nucléaire

Fond diffus cosmologique

Formation de l'hydrogène neutre

Univers moderne

Les électrons libres
diffusent la lumière

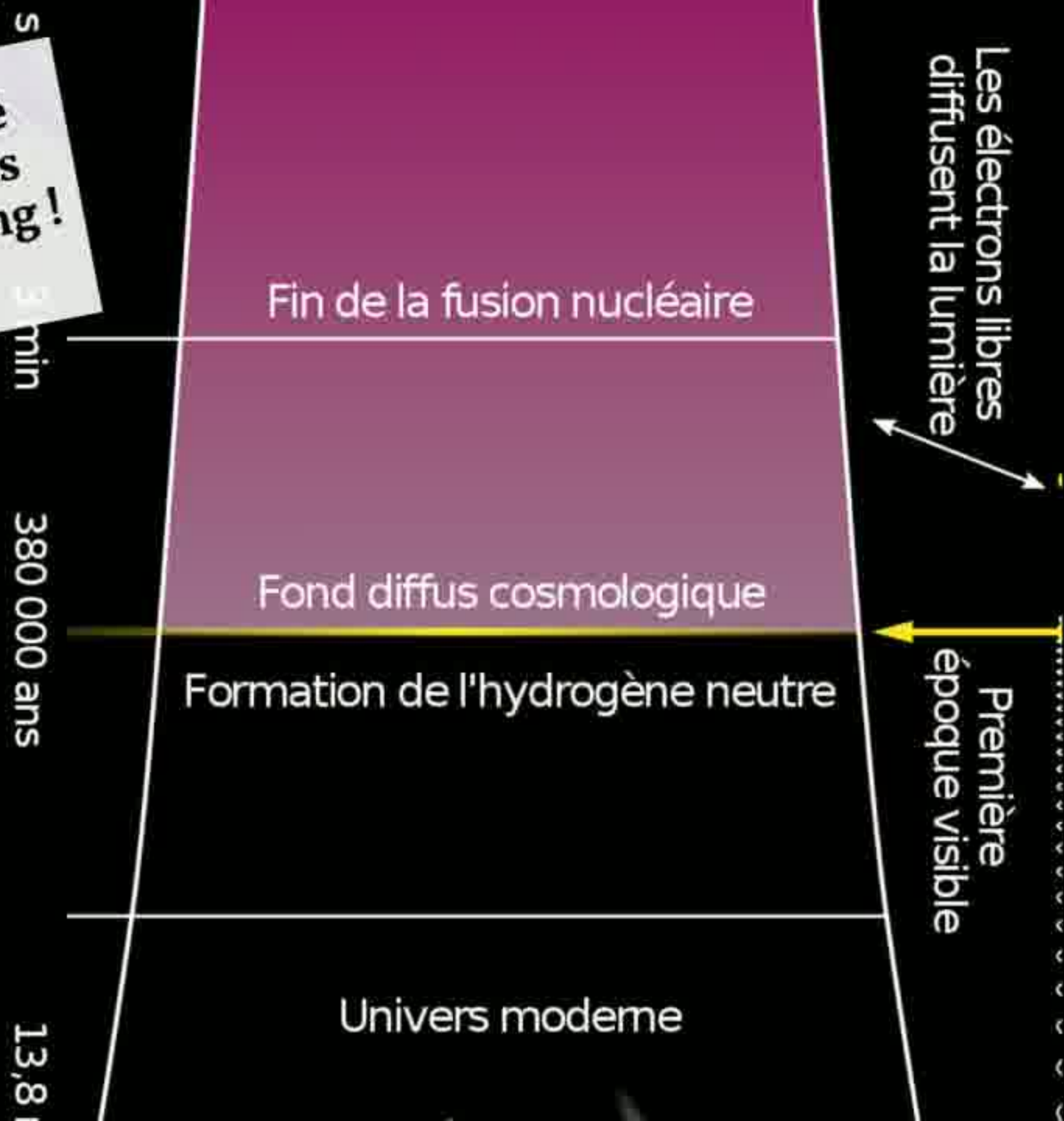
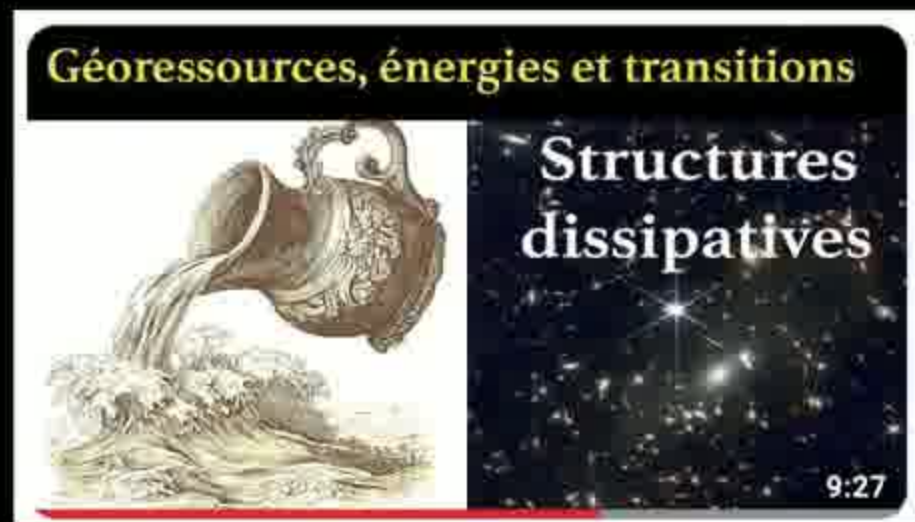
Première
époque visible

Âge sombre

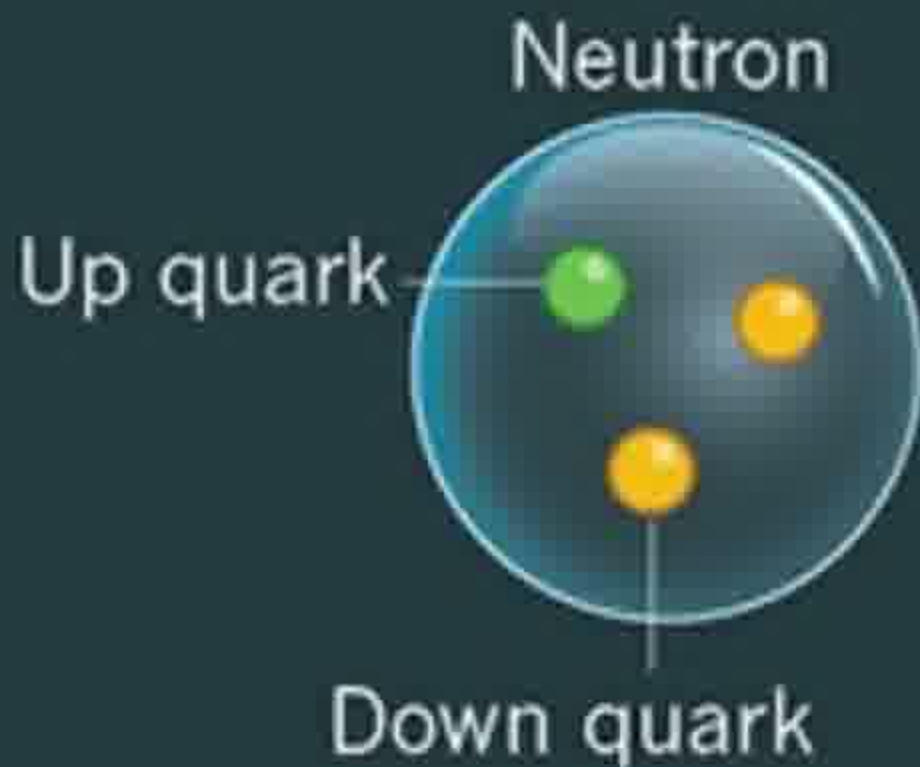
SCIENCE & ACTUALITÉS

Le télescope James-Webb a débusqué une surprenante galaxie 350 millions d'années seulement après le Big Bang !

ASTRONOMIE | BIG BANG | TÉLÉSCOPE JAMES WEBB | COSMOLOGIE



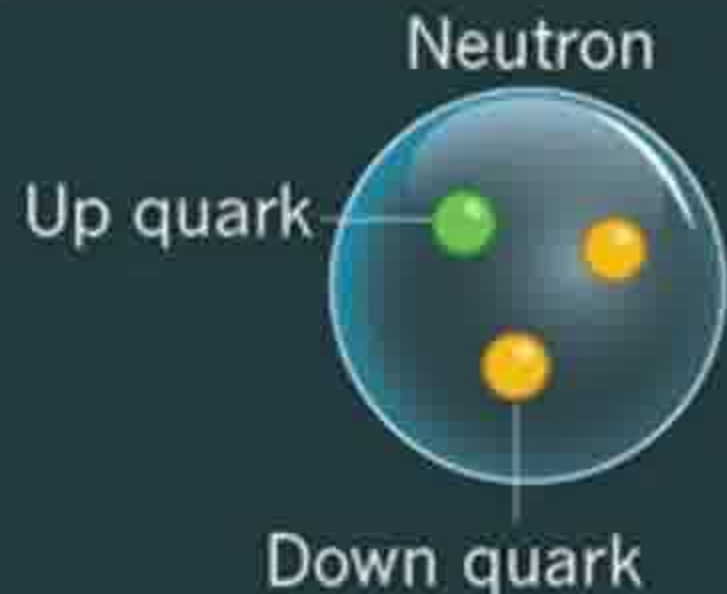
Protons, neutrons et noyaux ne sont pas des structures dissipatives !



Proton

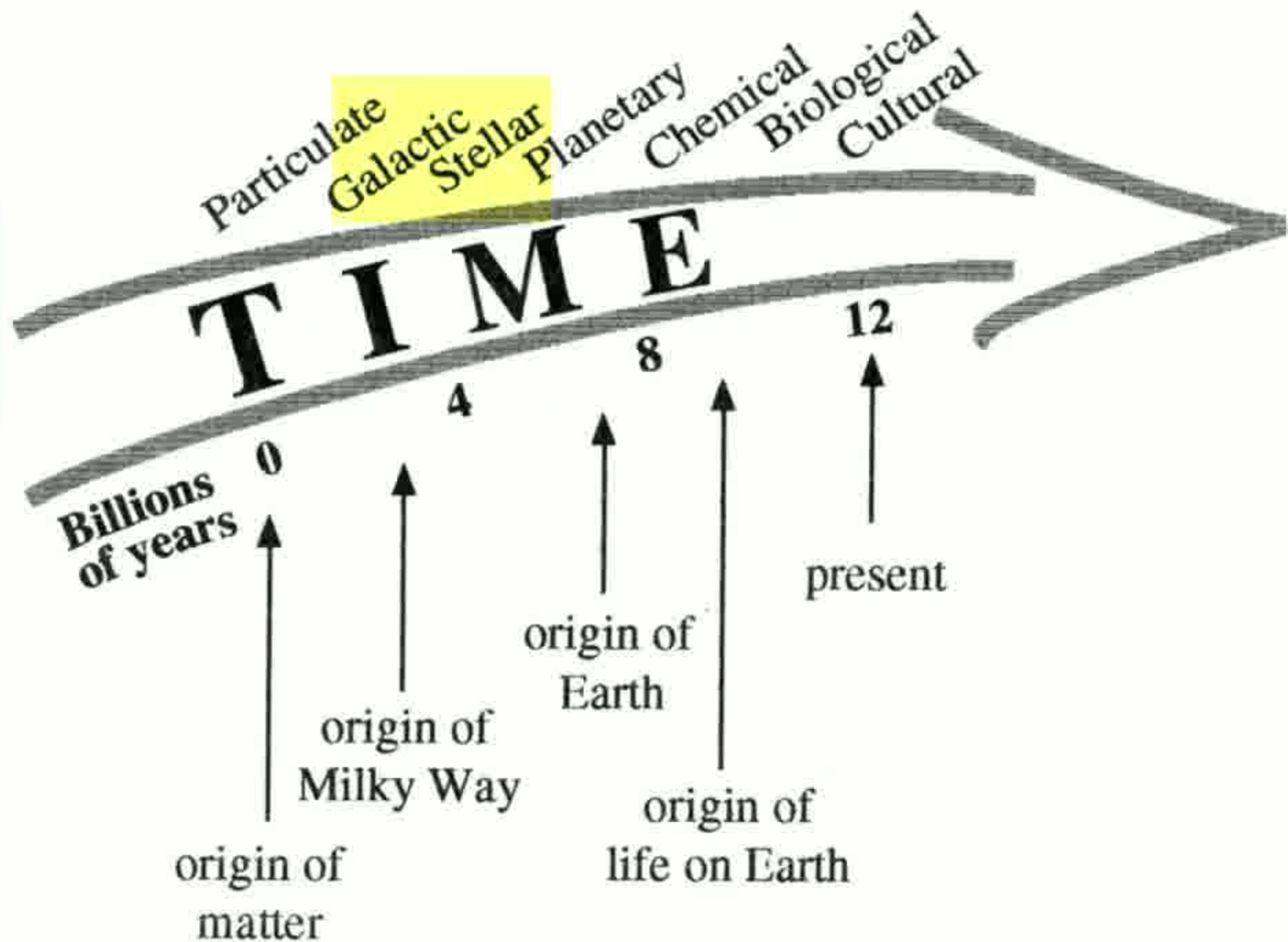


Protons, neutrons et noyaux ne sont pas des structures dissipatives !



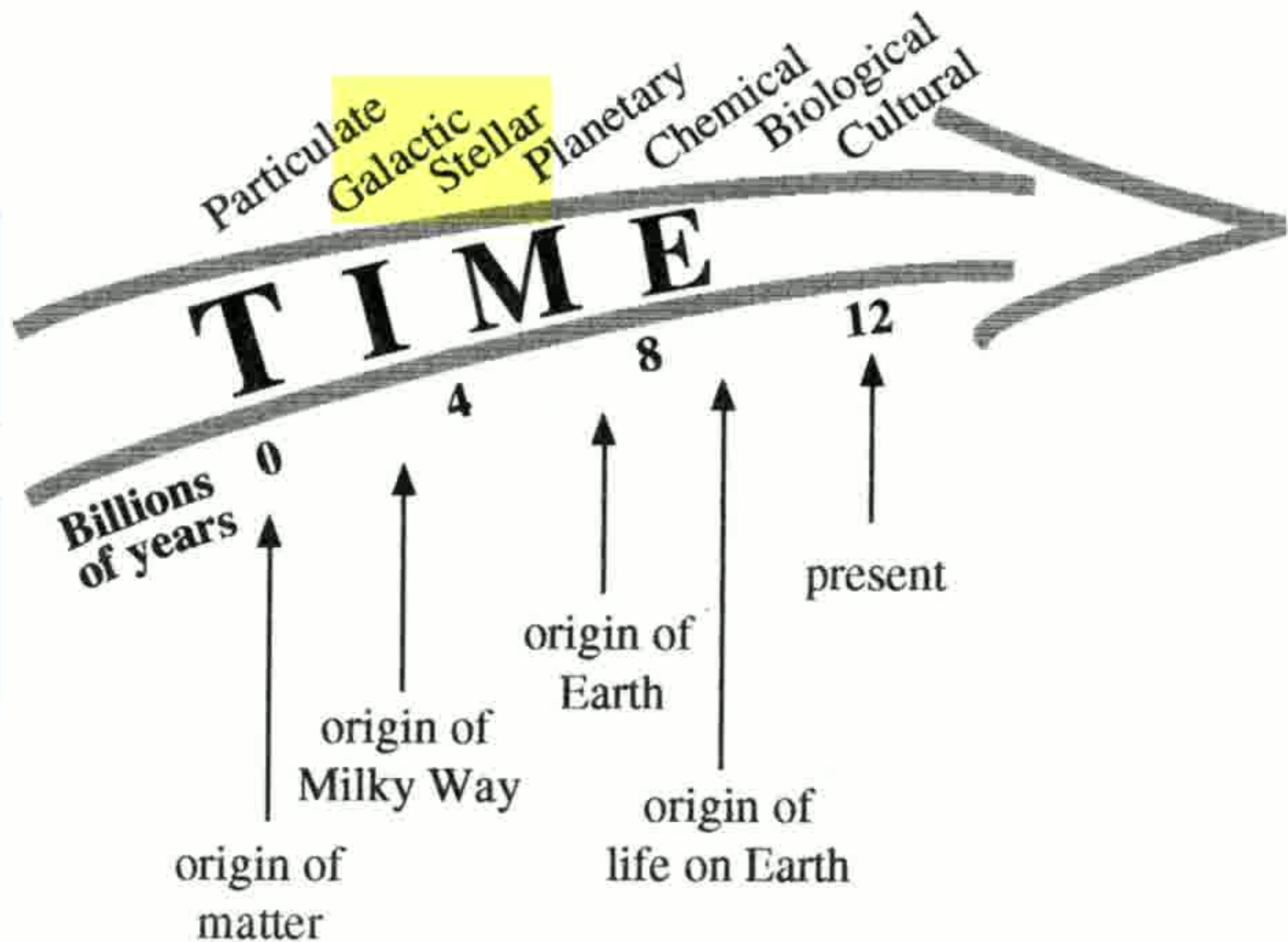
Toutes les entités dans l'univers ne sont pas des structures dissipatives

Phase galactique



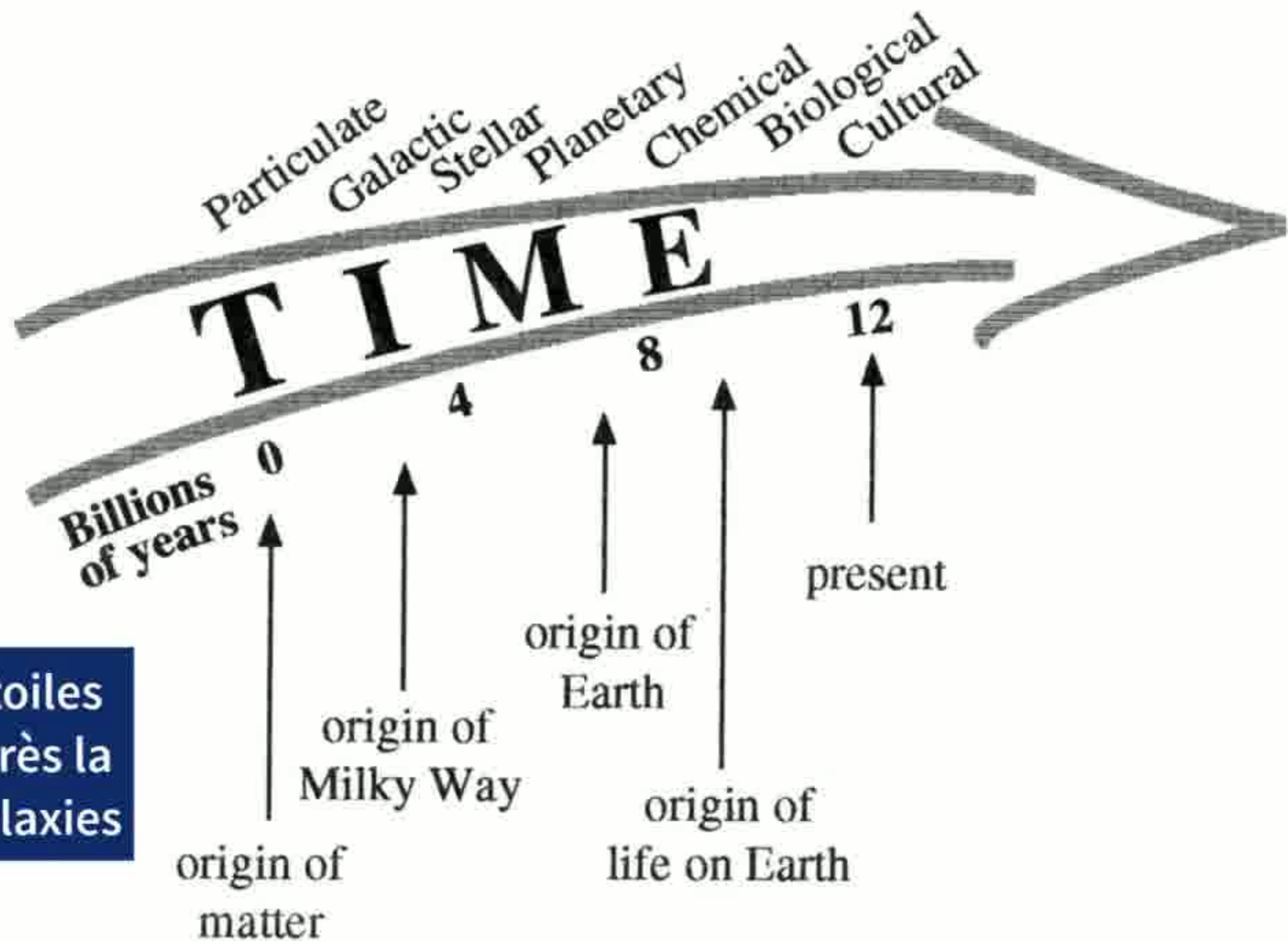
Phase
galactique

Phase
stellaire





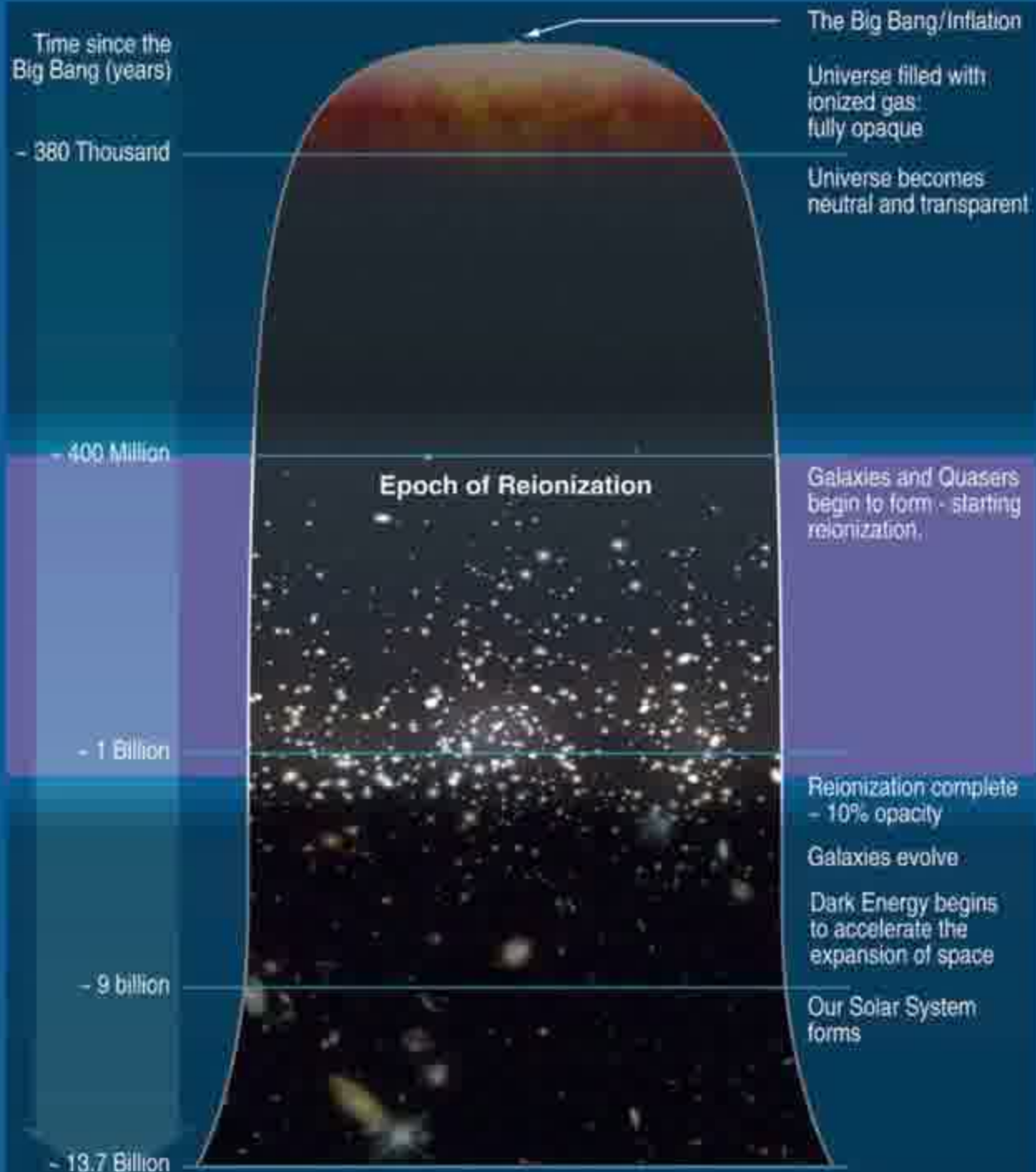




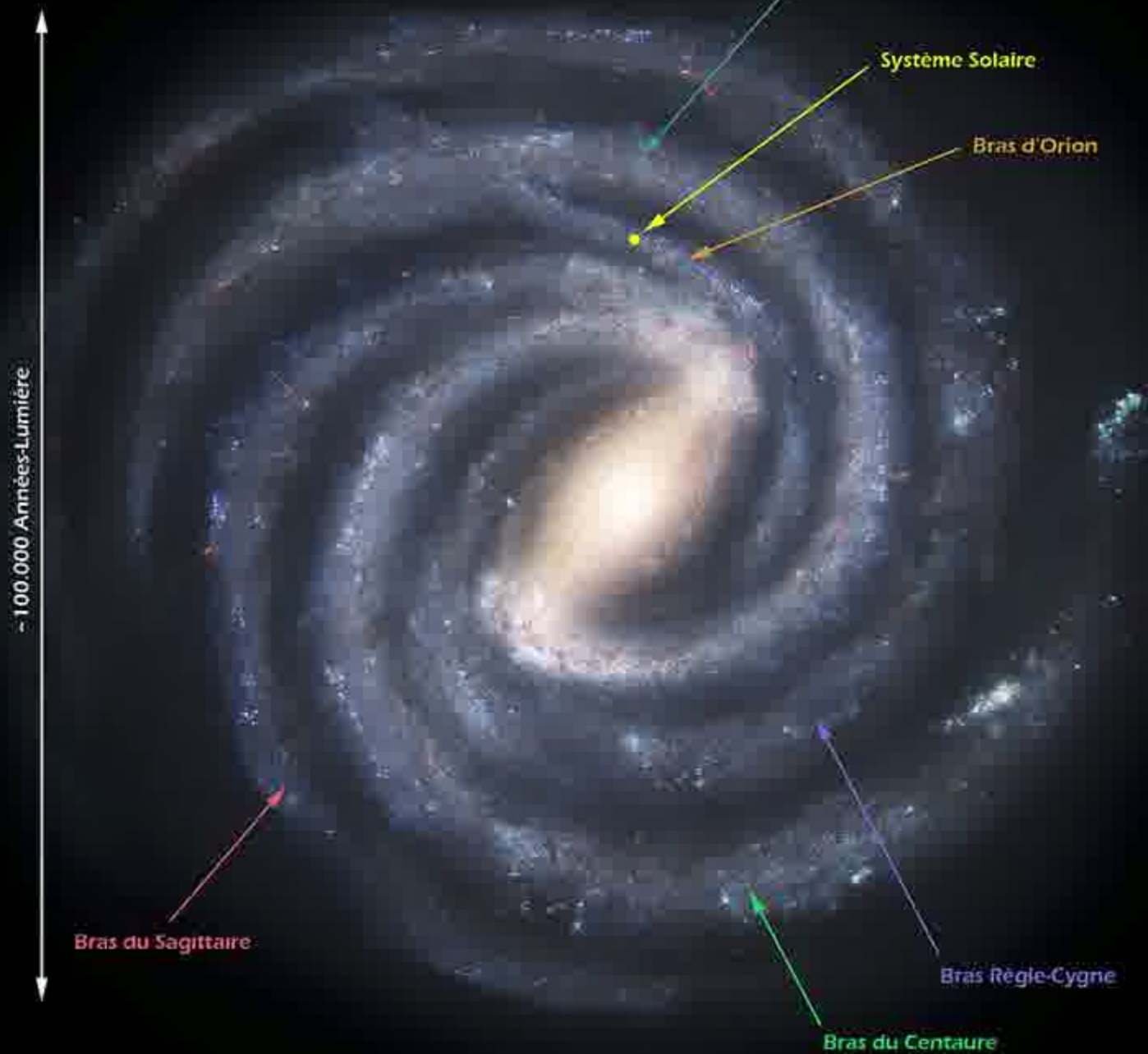
L'âge d'or des étoiles
est venu bien après la
formation des galaxies

Âge sombre

Formation
des galaxies



La Voie Lactée



Time since the Big Bang (years)

380 Thousand

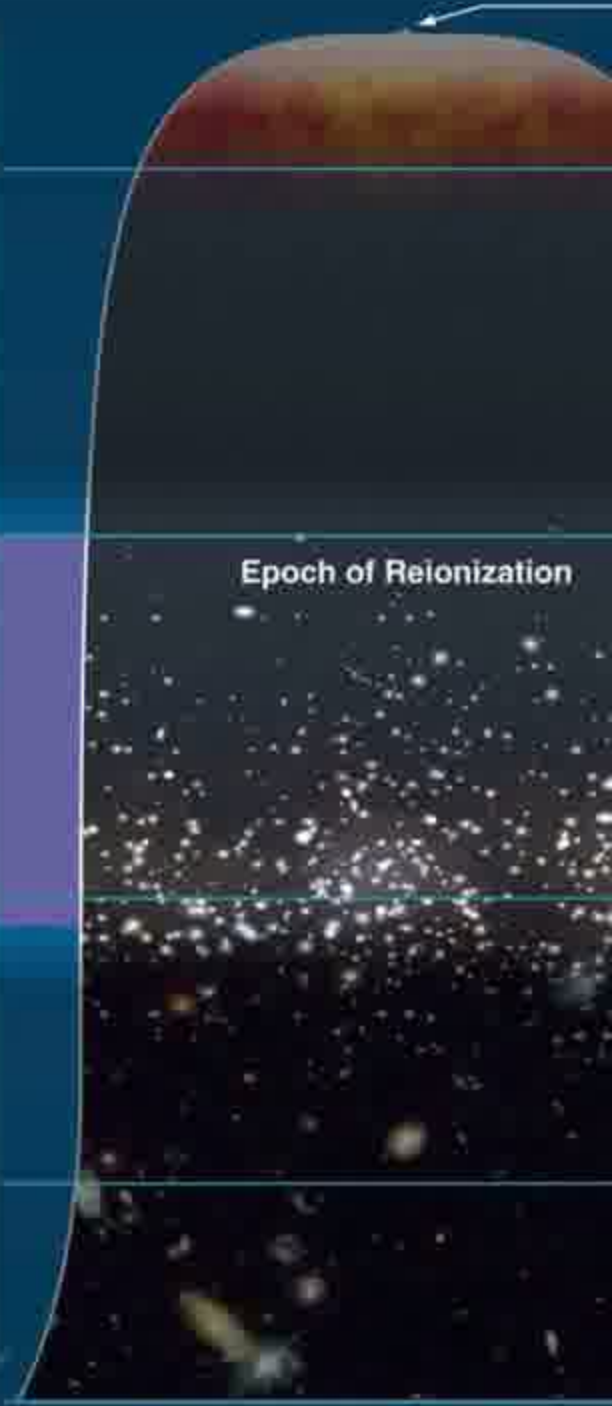
~ 400 Million

~ 1 Billion

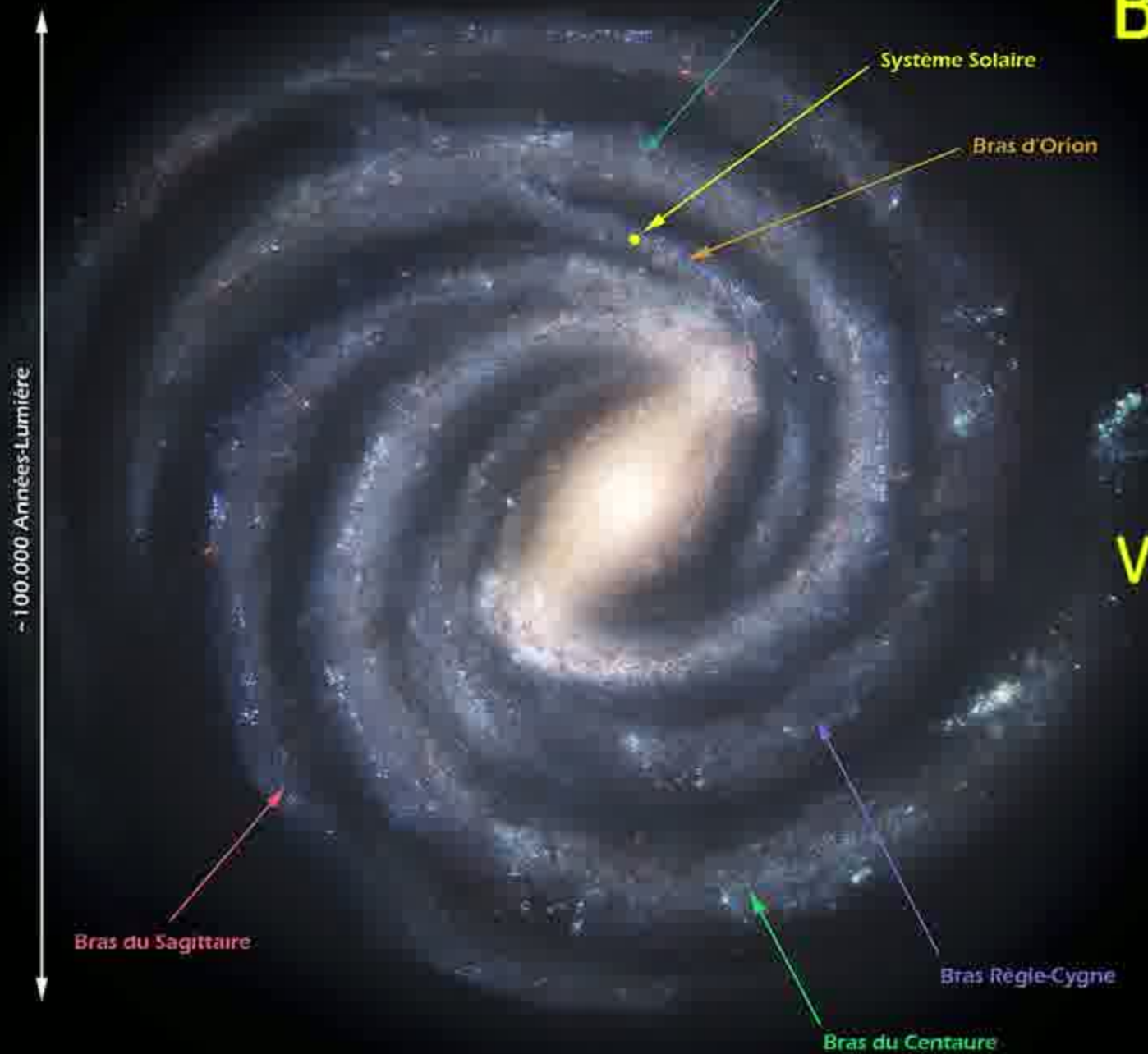
~ 9 billion

~ 13.7 Billion

Epoch of Reionization



La Voie Lactée



Big Bang

700 Ma

Voie Lactée

Time since the Big Bang (years)

380 Thousand

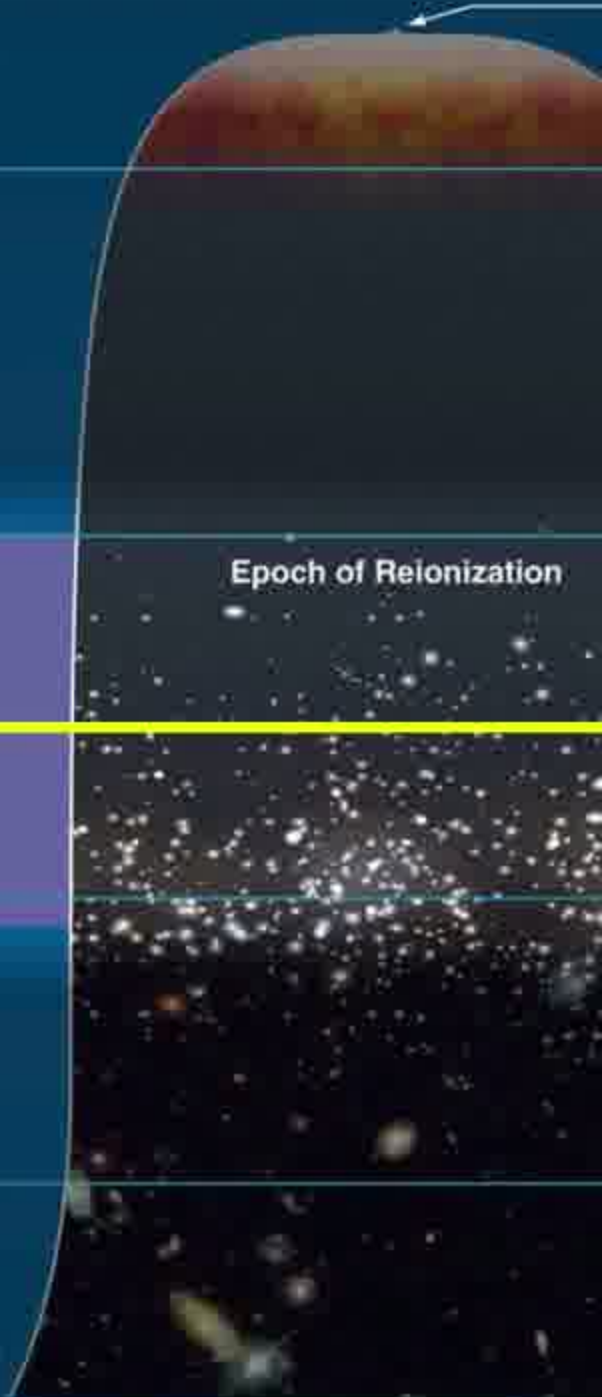
400 Million

Epoch of Reionization

1 Billion

9 billion

13.7 Billion

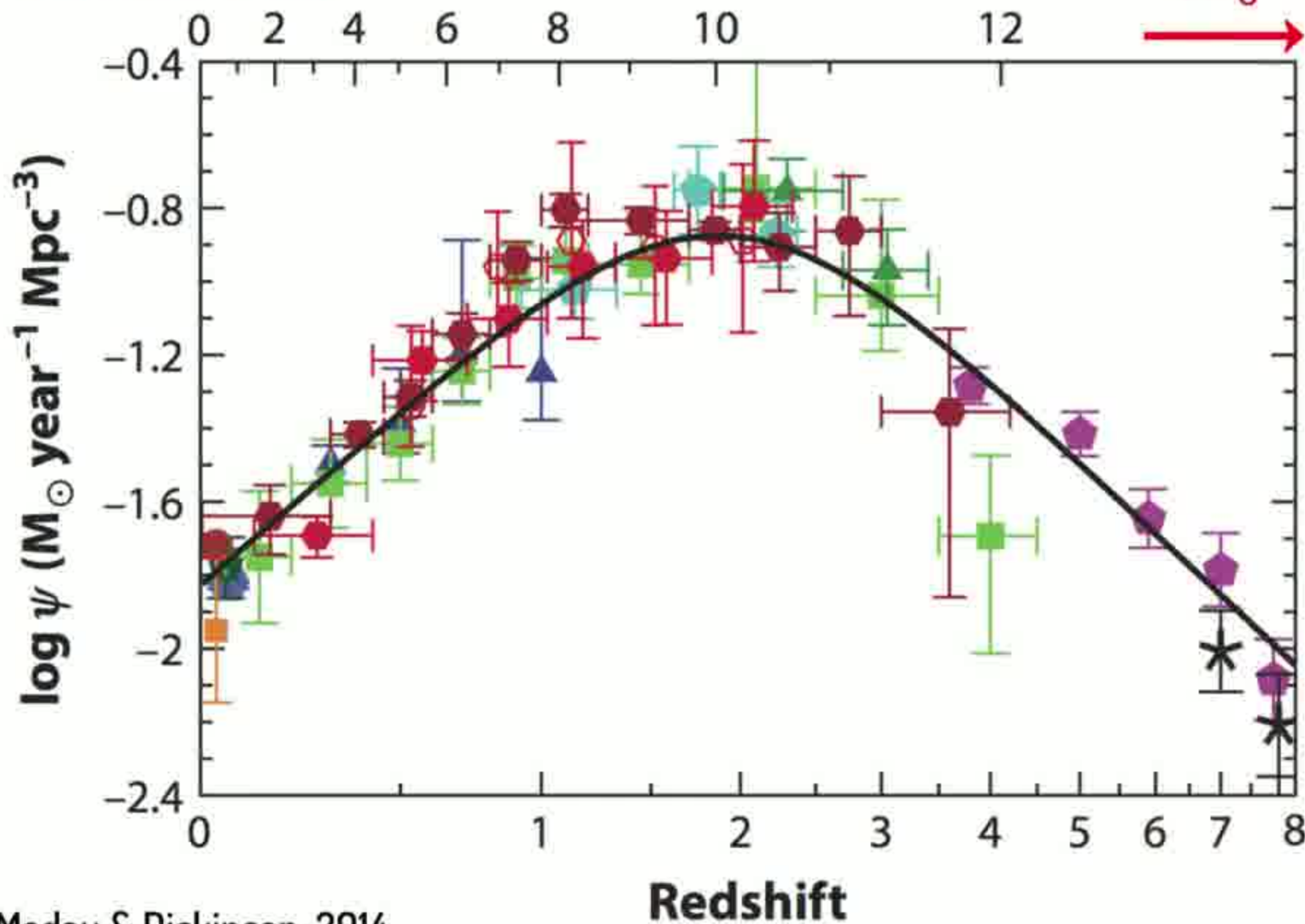


Taux de formation des étoiles

Maintenant

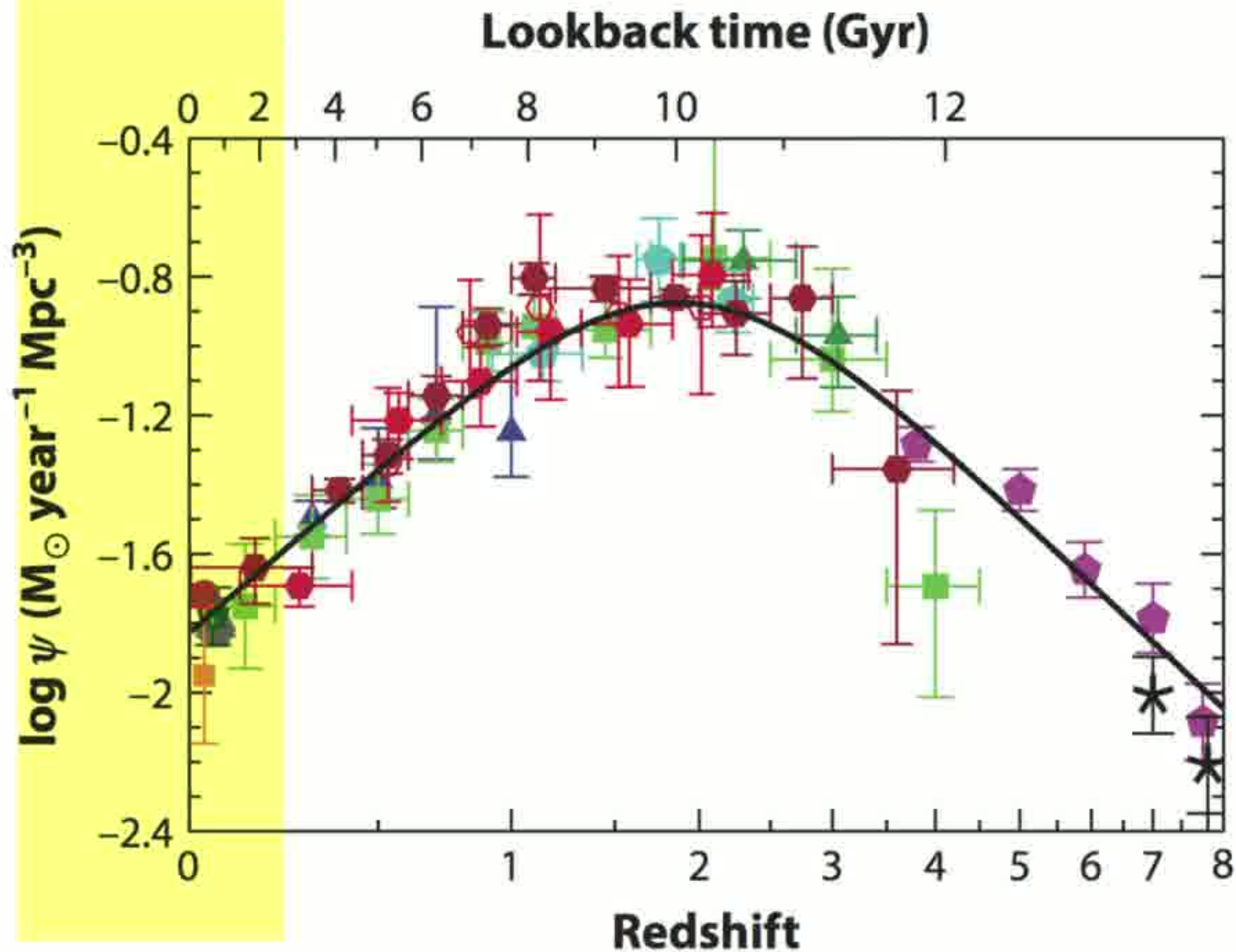
Lookback time (Gyr)

Vers le Big
Bang
→



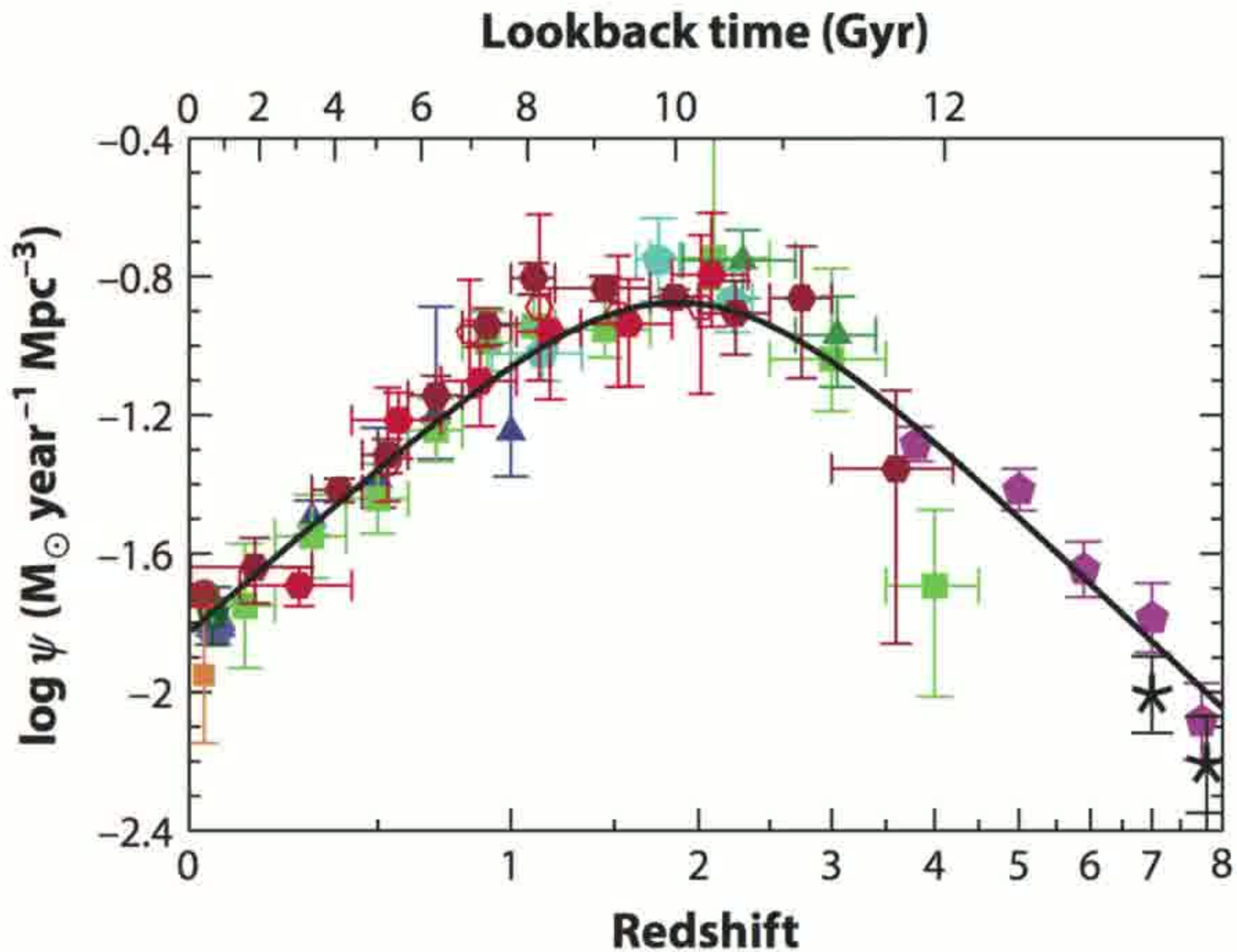
Taux de formation
des étoiles

La Voie Lactée
produit actuellement
environ une masse
solaire comme masse
stellaire par an !



Taux de formation
des étoiles

L'univers forme
de moins en
moins d'étoiles

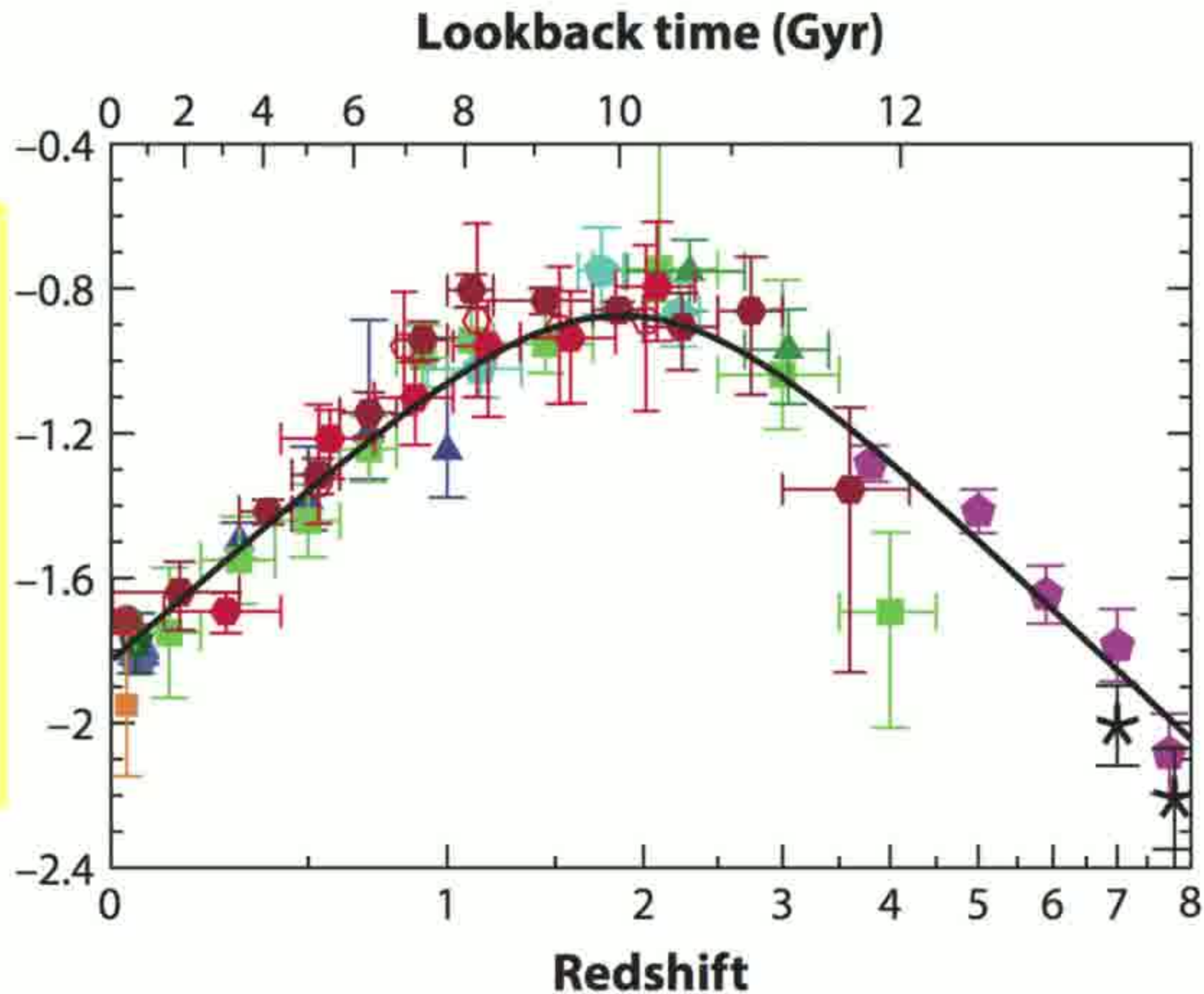


Taux de formation
des étoiles

Nombre de masses
stellaires par unité de
temps et de volume

Attention: échelles
logarithmiques !

$\log \psi \text{ (M}_{\odot} \text{ year}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})$

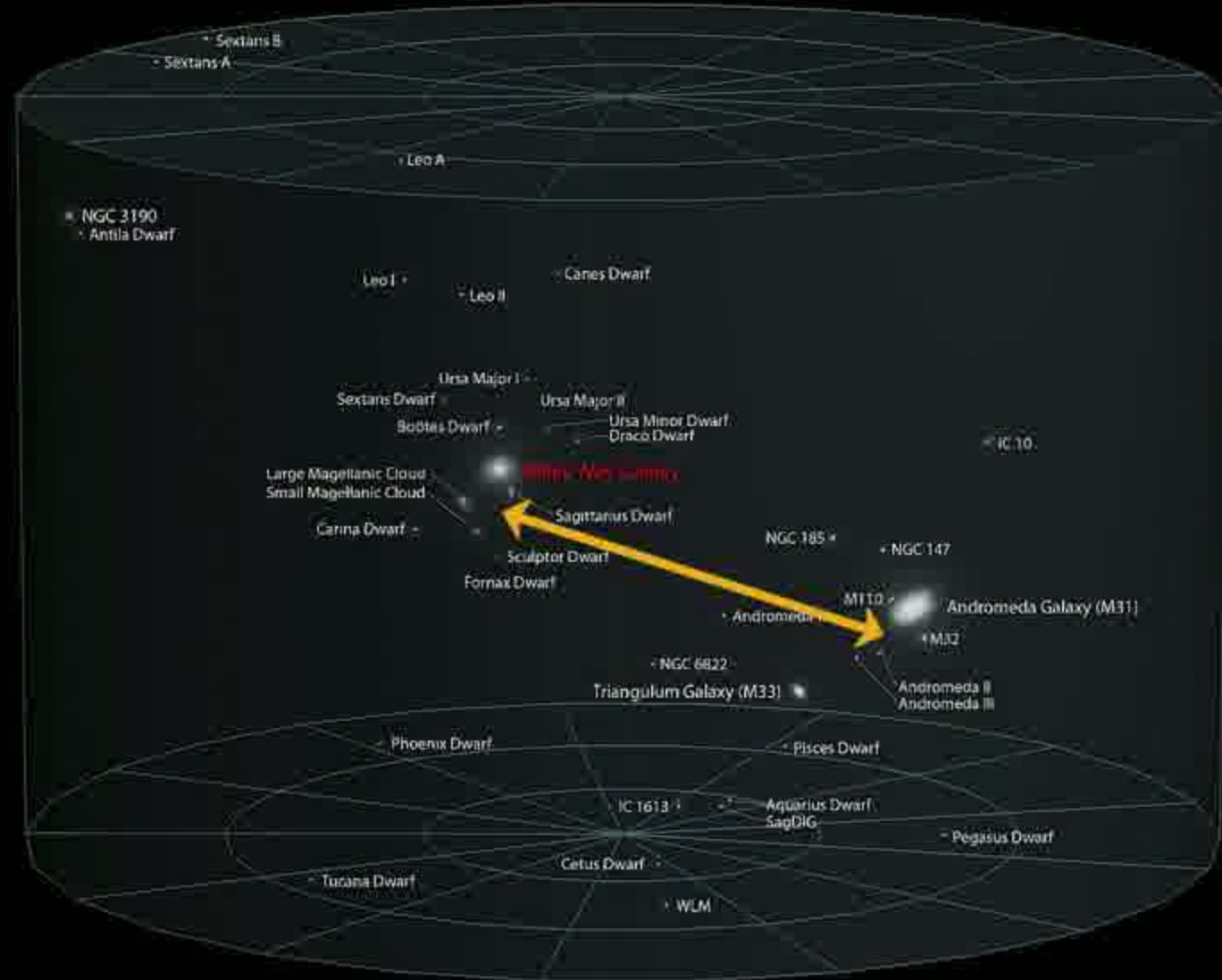


Le mégaparsec = une unité
utile pour mesurer des
distances intergalactiques

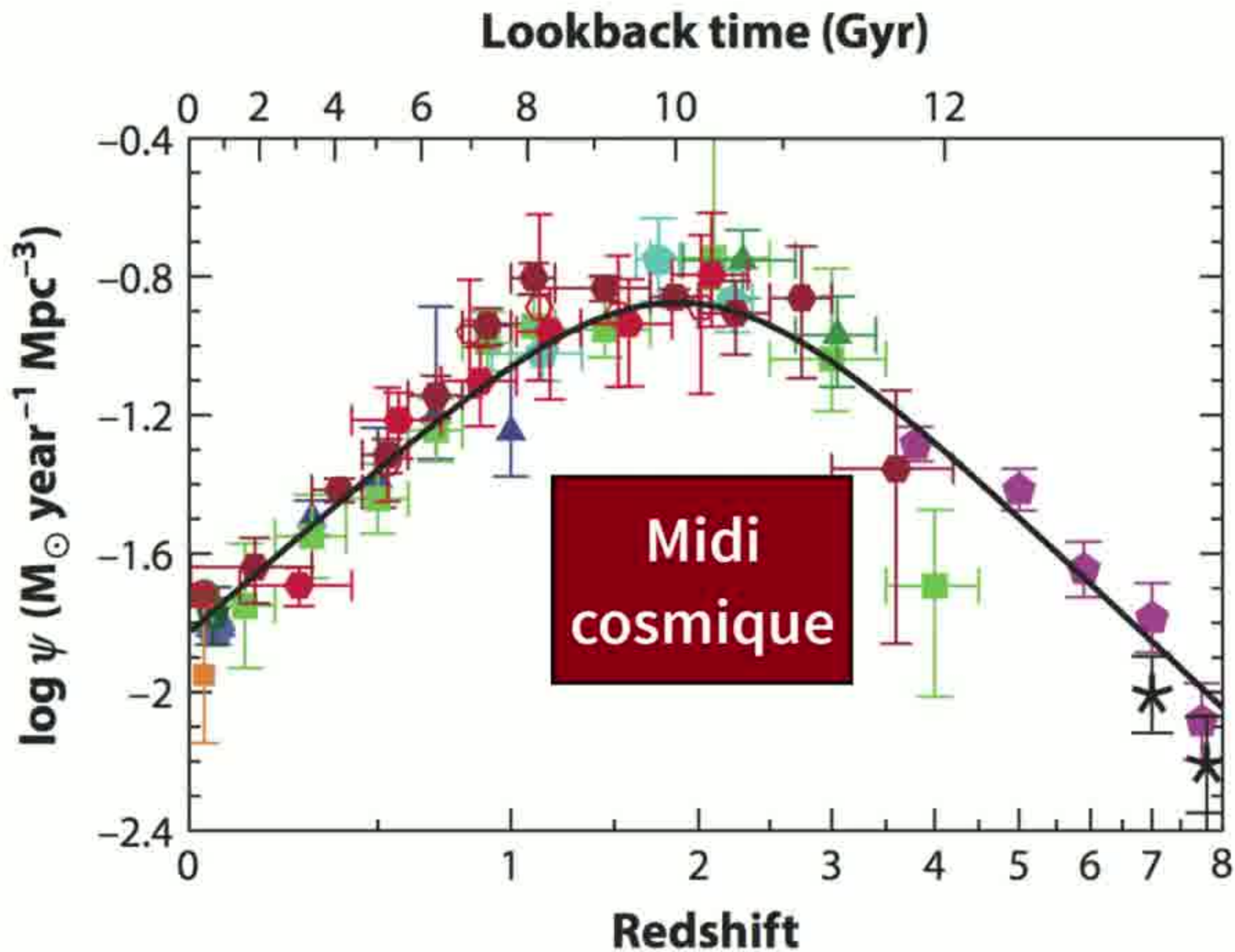
Distance Voie Lactée - Galaxie
d'Andromède ~ 0.78 Mpc

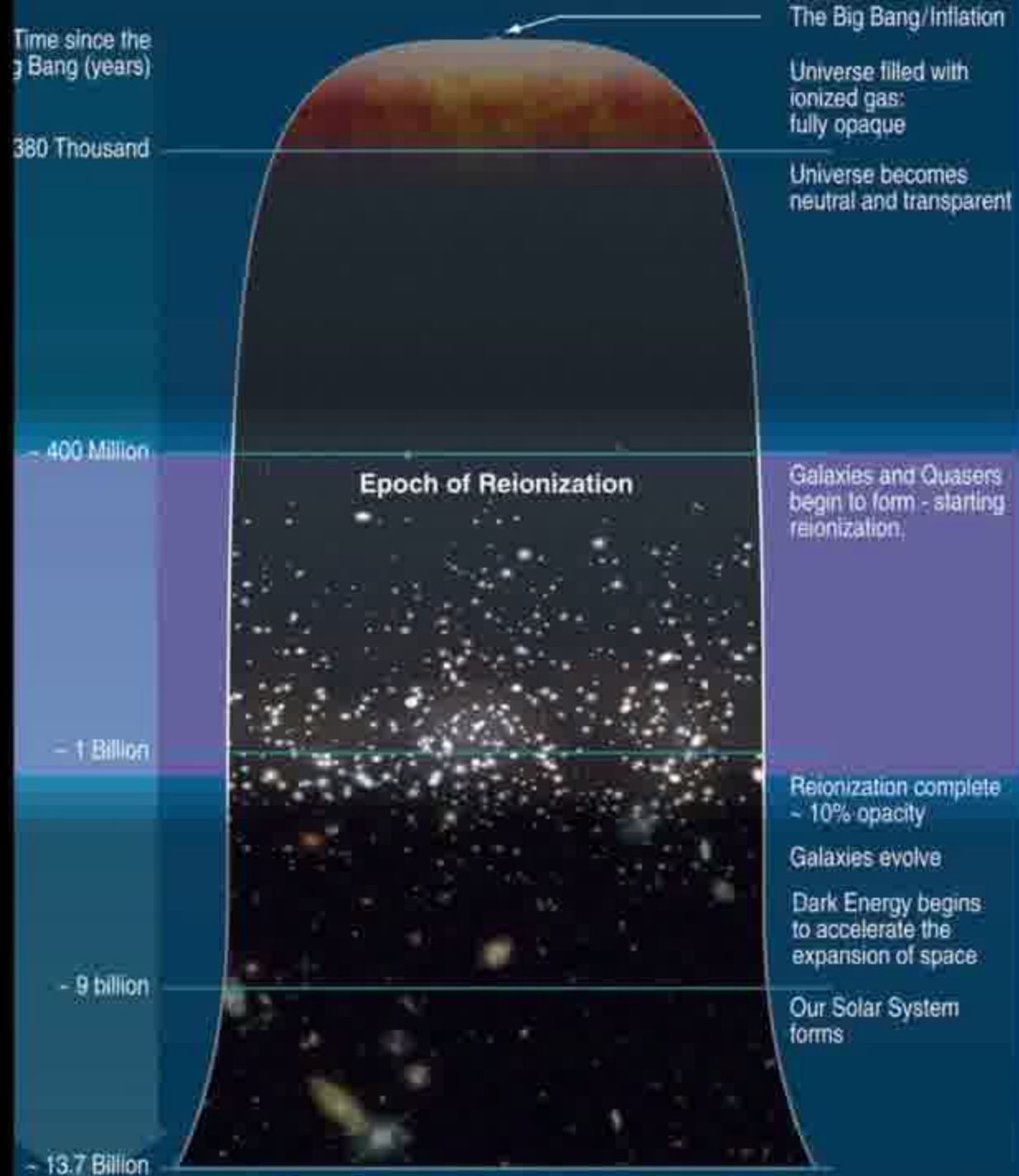
1 Mpc = 3.26 millions
d'années lumière

Local Galactic Group



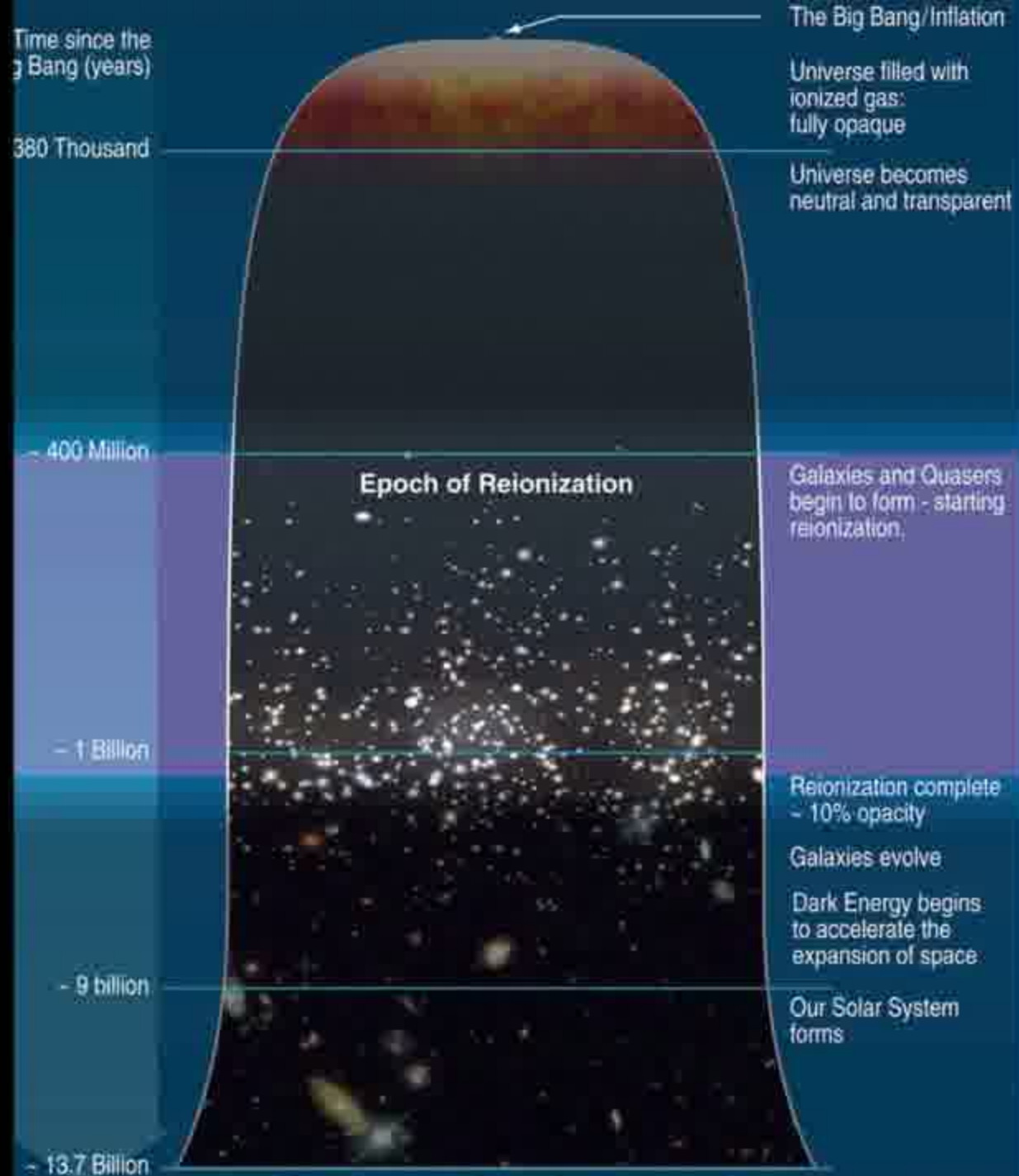
L'univers forme dix fois
moins d'étoiles qu'il y a
2-3 milliards d'années
après le Big Bang

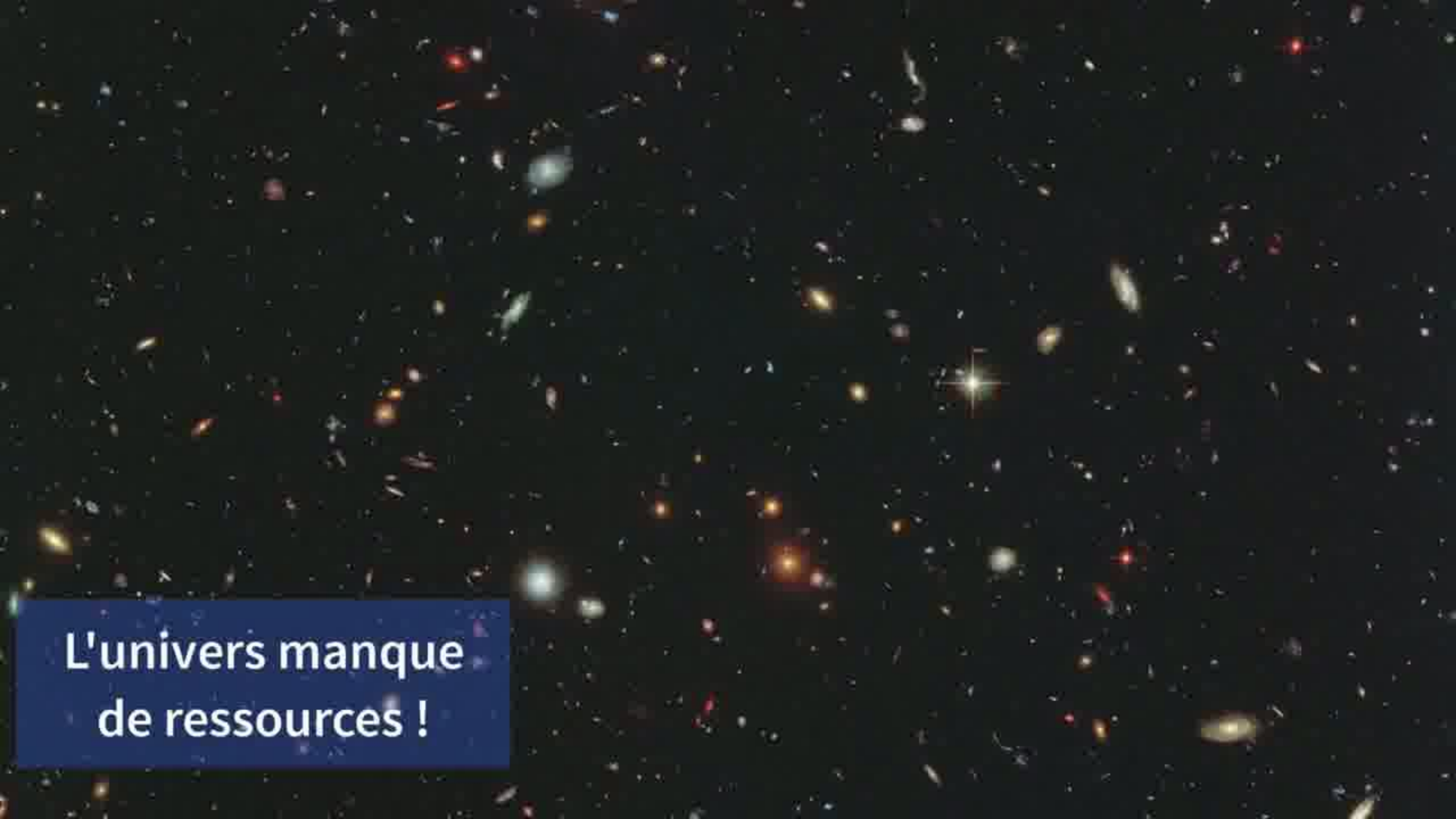




L'univers actuel est en
décroissance

L'univers actuel : des
étoiles et des galaxies





L'univers manque
de ressources !

Les nuages moléculaires

entre les étoiles, dans les bras
des spirales des galaxies



Les nuages moléculaires

Le carburant actuel de
l'univers, c'est l'hydrogène

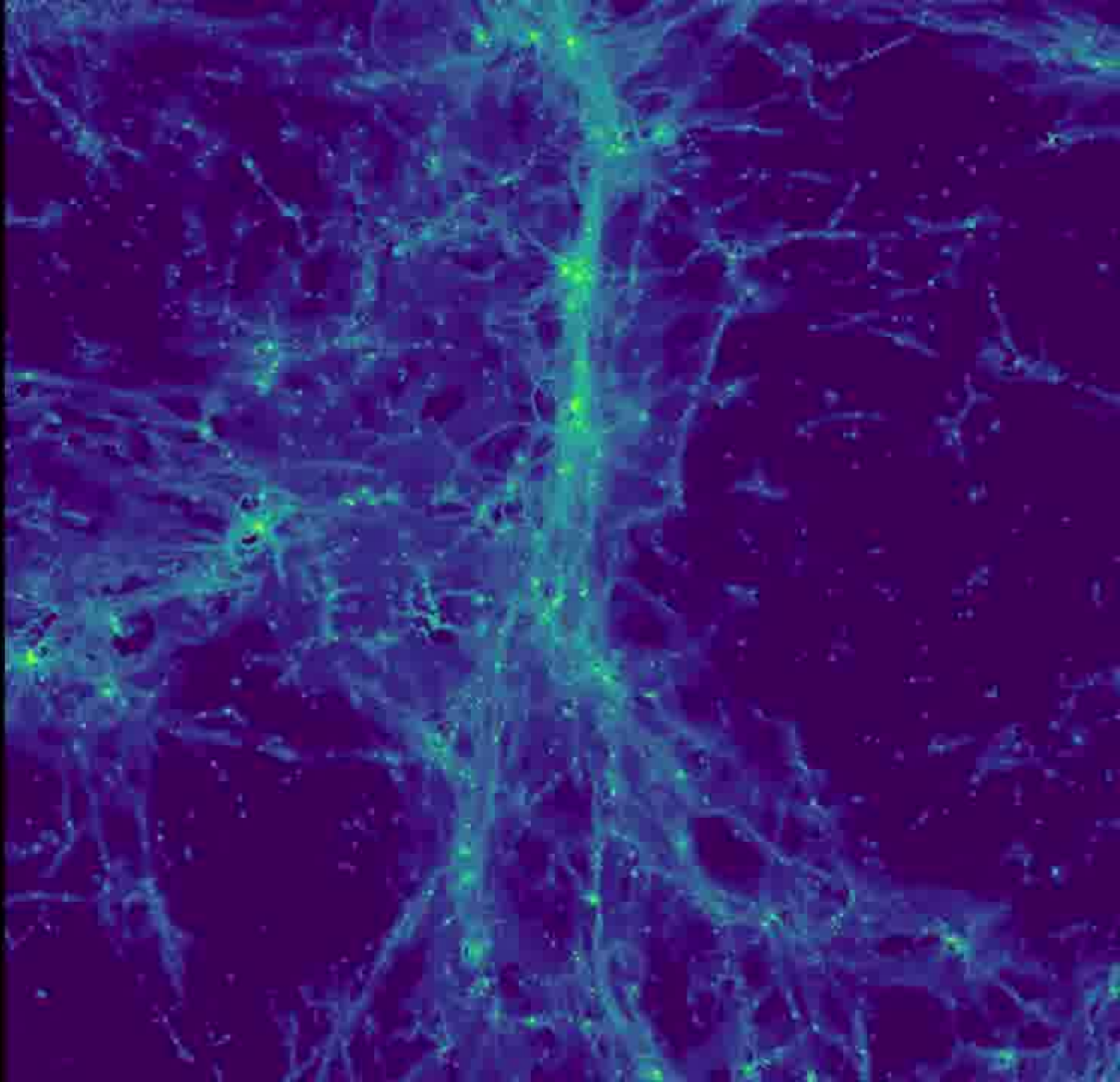
Nébuleuse de l'Aigle



La toile cosmique

L'univers devient
filandreux !

Chaque point représente
un amas de galaxie



Étoiles en formation par
effondrement
gravitationnel des nuages
moléculaires d'une galaxie

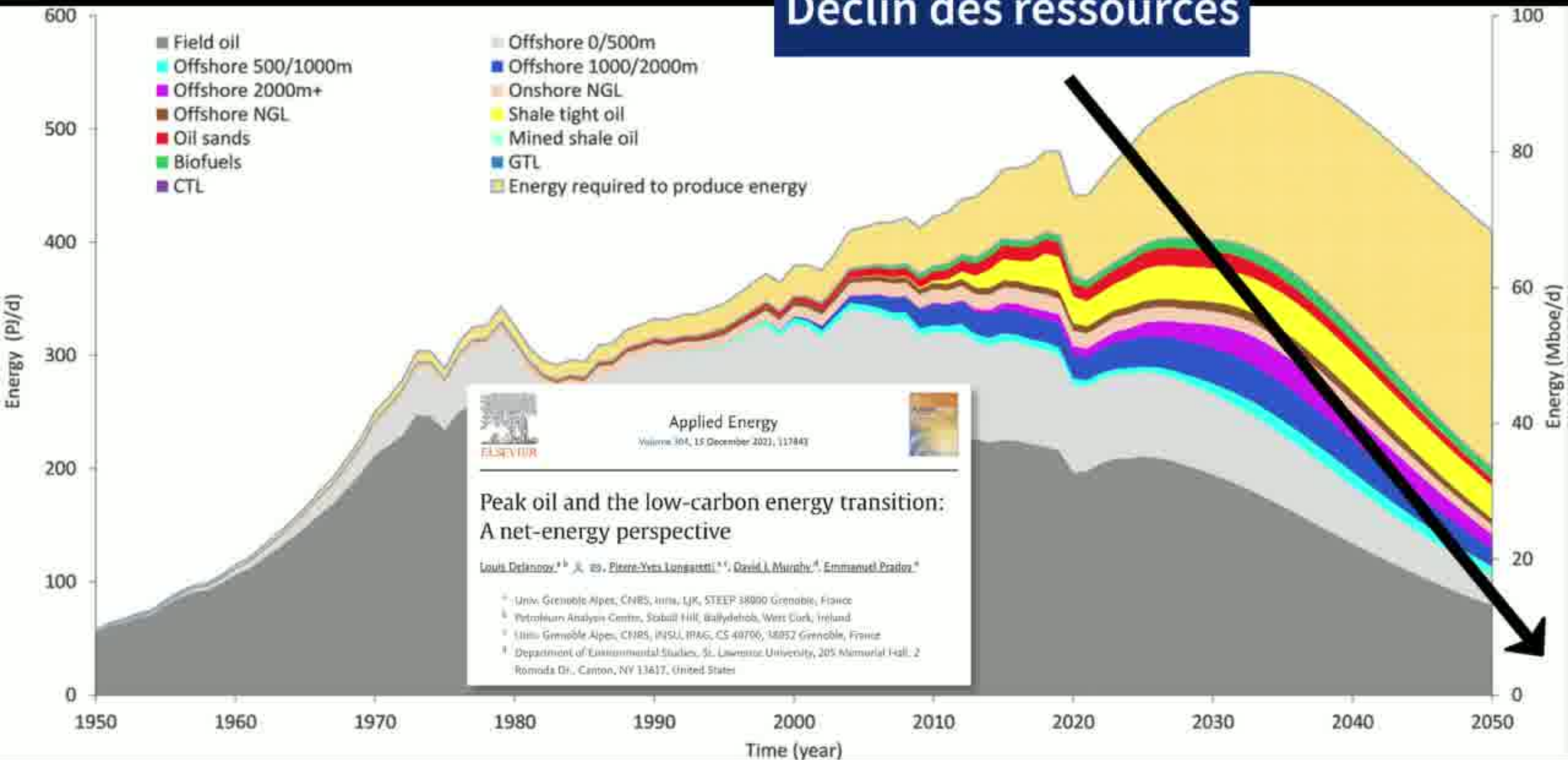
Dans l'univers, la ressource
en hydrogène se fait rare,
car trop dispersée !



Épuisement des ressources ?



Déclin des ressources



La phase stellaire prépare la suite

Nucléosynthèse stellaire



La nucléosynthèse primordiale

3 minutes après le Big Bang

Univers = hydrogène + hélium

La nucléosynthèse stellaire



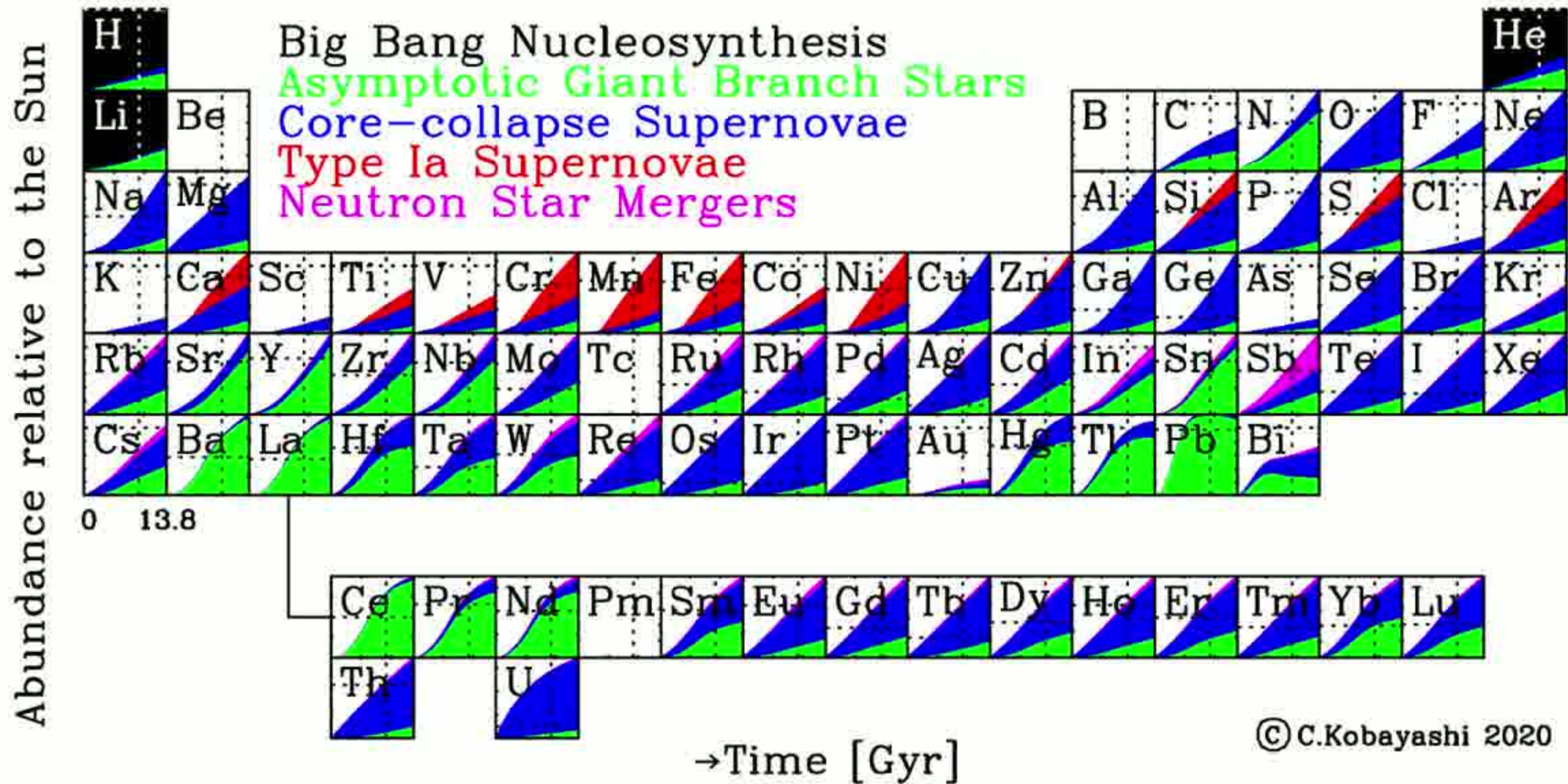
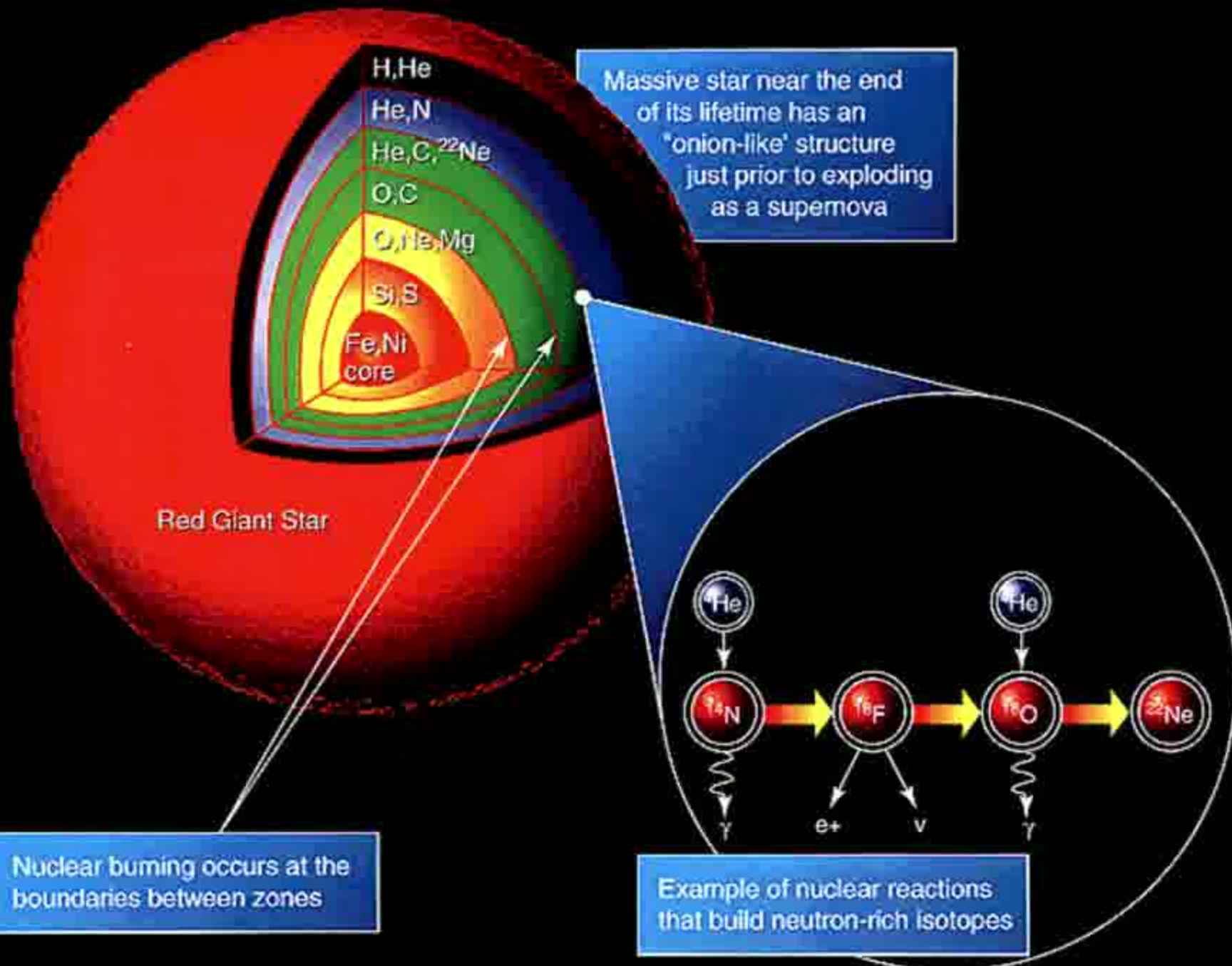


Figure 39. The time evolution (in Gyr) of the origin of elements in the periodic table: Big Bang nucleosynthesis (black), AGB stars (green), core-collapse supernovae including SNe II, HNe, ECSNe, and MRSNe (blue), SNe Ia (red), and NSMs (magenta). The amounts returned via stellar mass loss are also included for AGB stars and core-collapse supernovae depending on the progenitor mass. The dotted lines indicate the observed solar values.

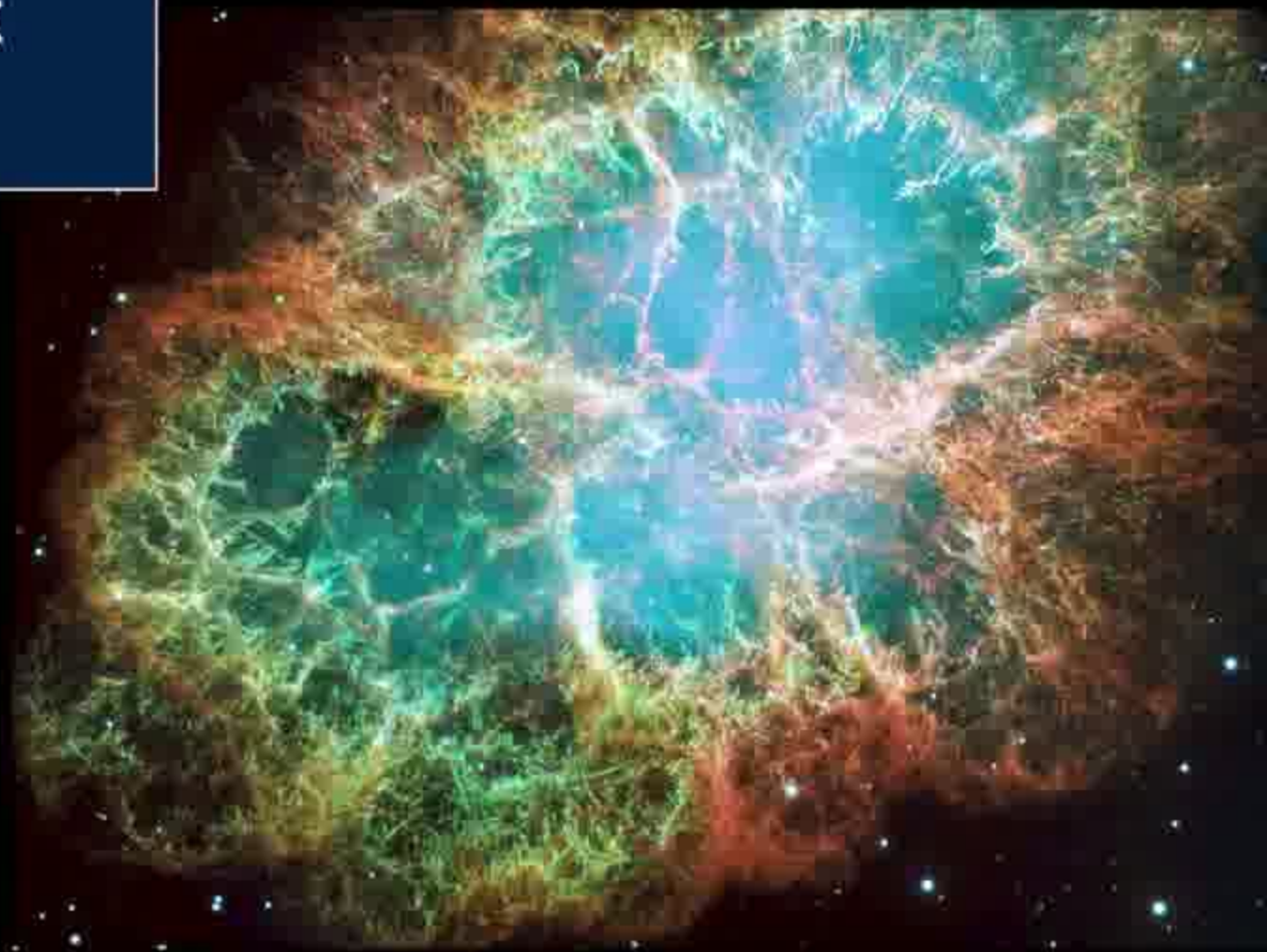
La nucléosynthèse stellaire dans une géante rouge



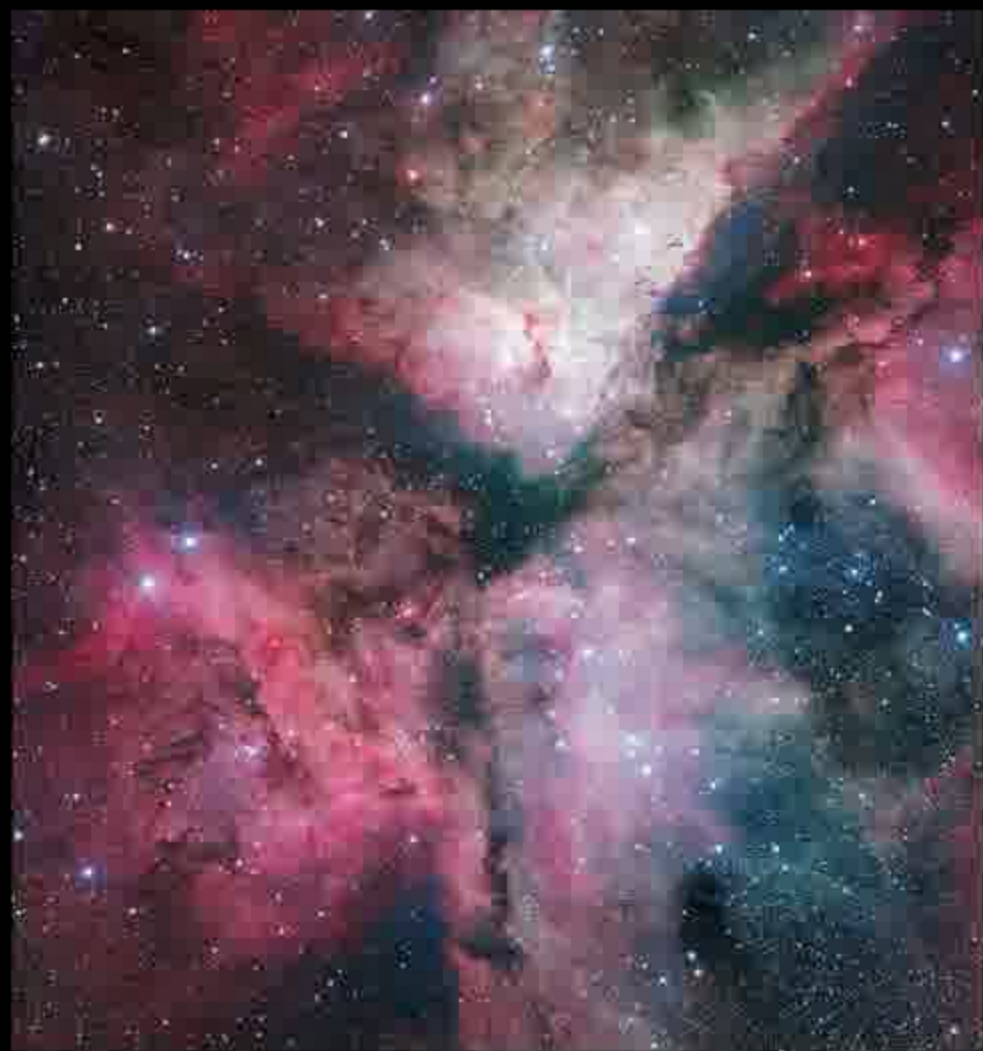
Nucléosynthèse stellaire et dispersion dans l'espace



Nébuleuse planétaire de
l'anneau austral



Nébuleuse du Crabe (Supernova)



Nébuleuse de la Carène



Nébuleuse de la Carène

Bleu: oxygène ionisé

Vert: hydrogène + azote ionisé

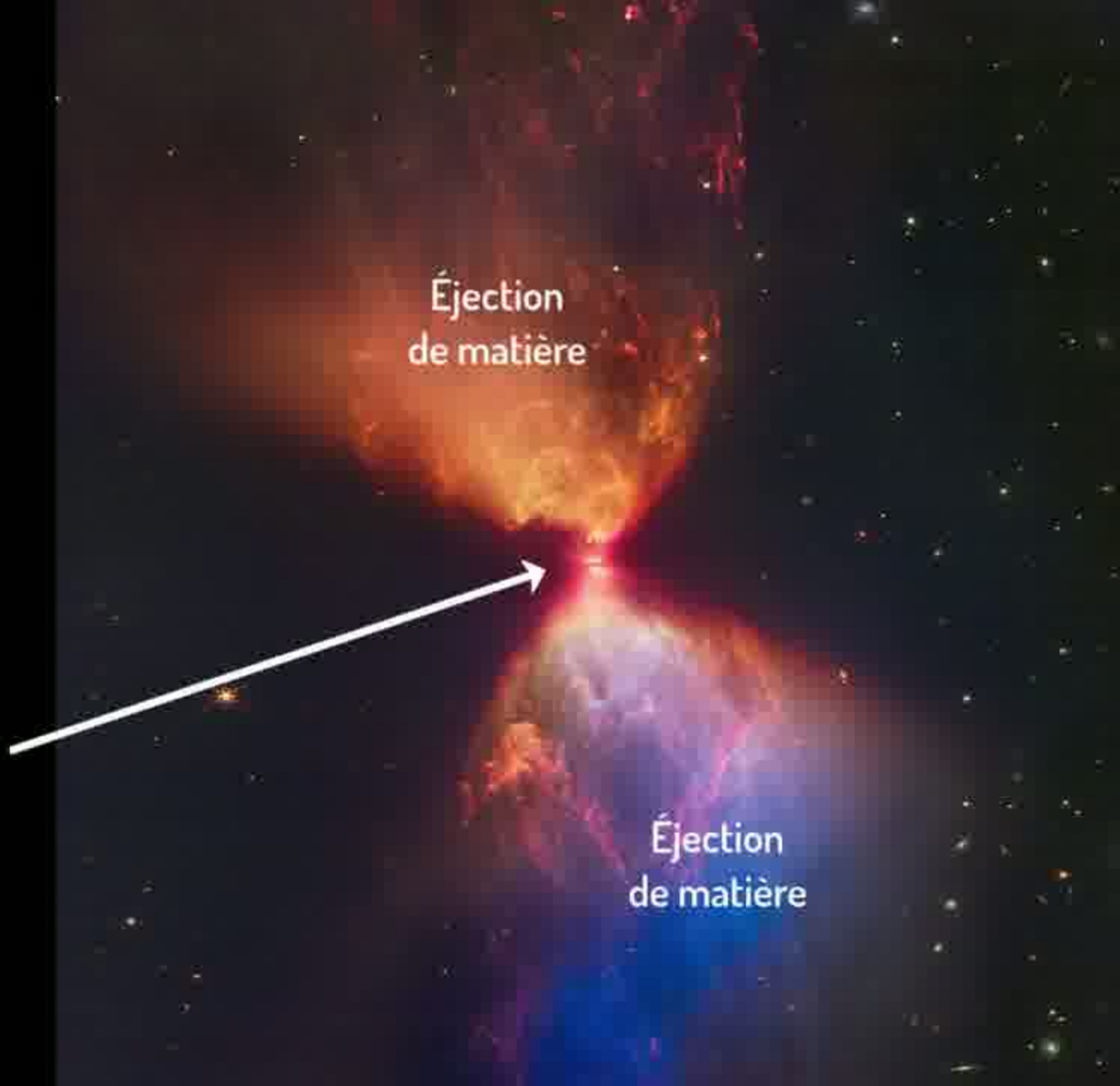


Rouge: soufre ionisé

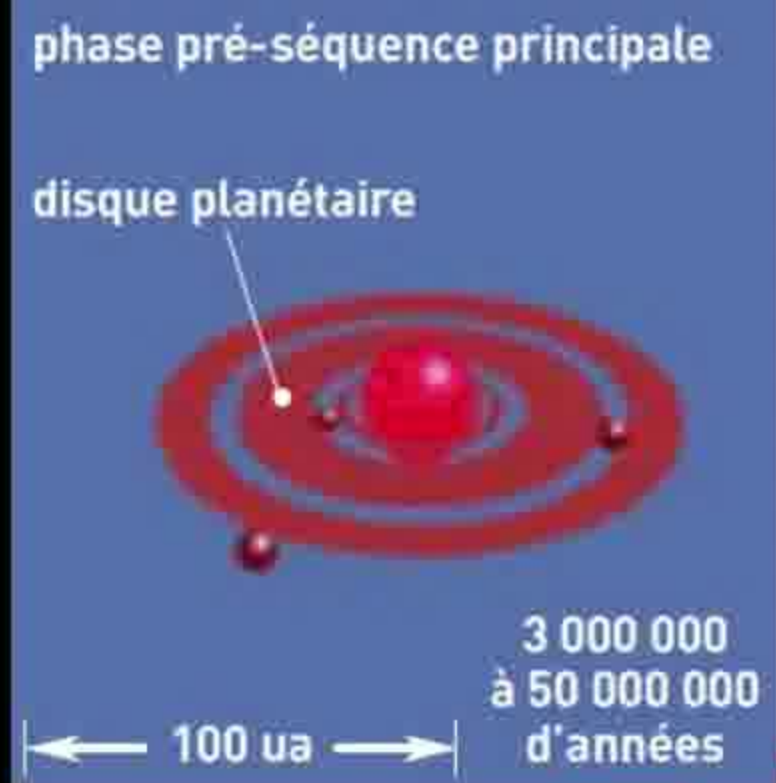
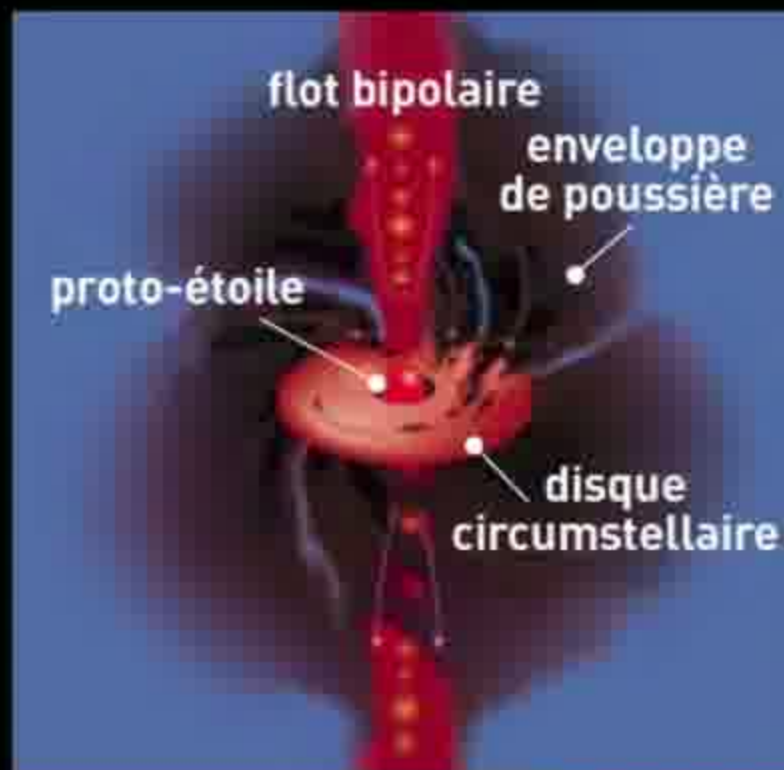
Une proto-étoile

Éjection
de matière

Éjection
de matière



H₂, He, CO, éthanol, ...

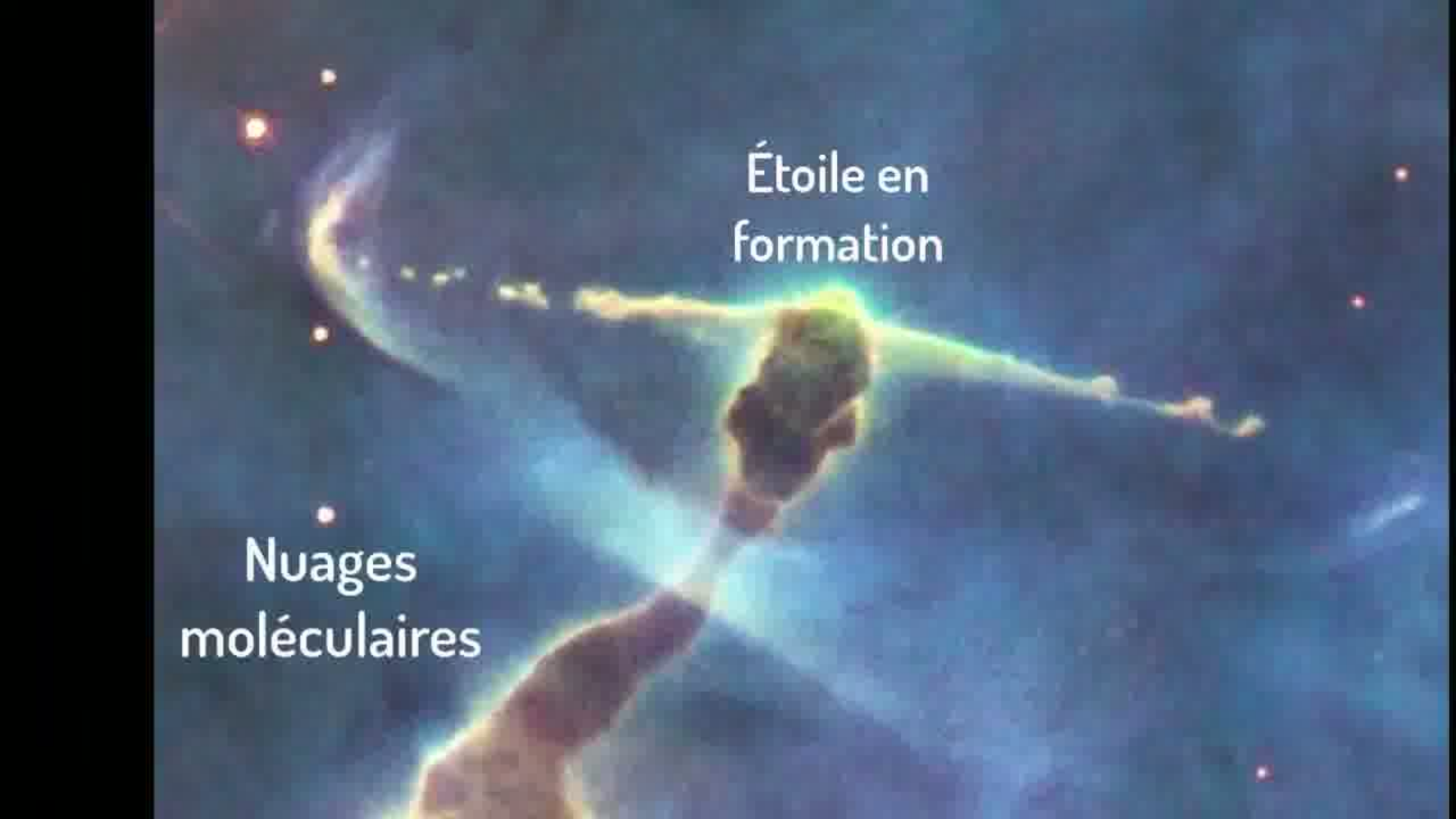


Étoile en
formation



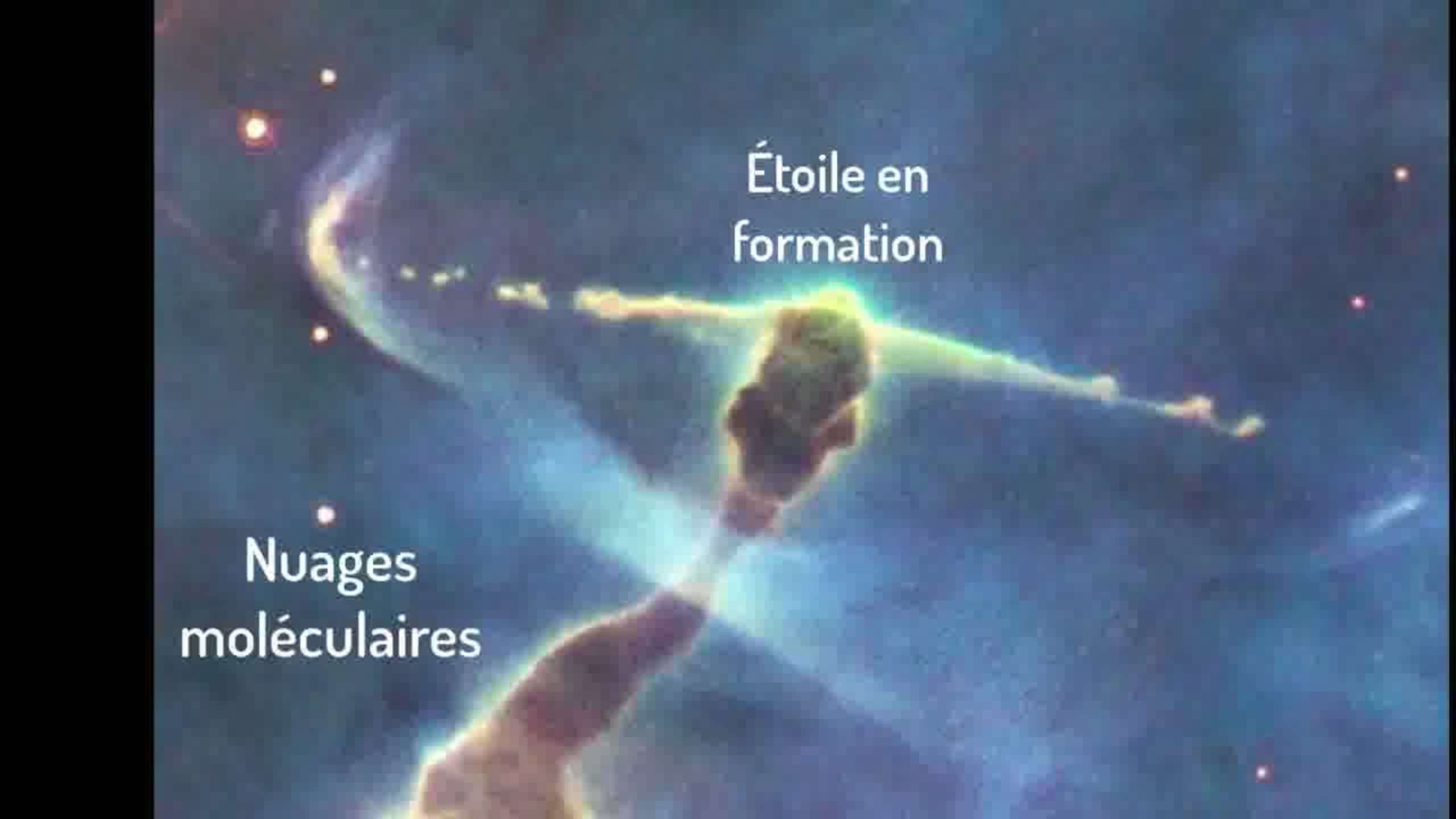
Étoile en
formation





Étoile en
formation

Nuages
moléculaires



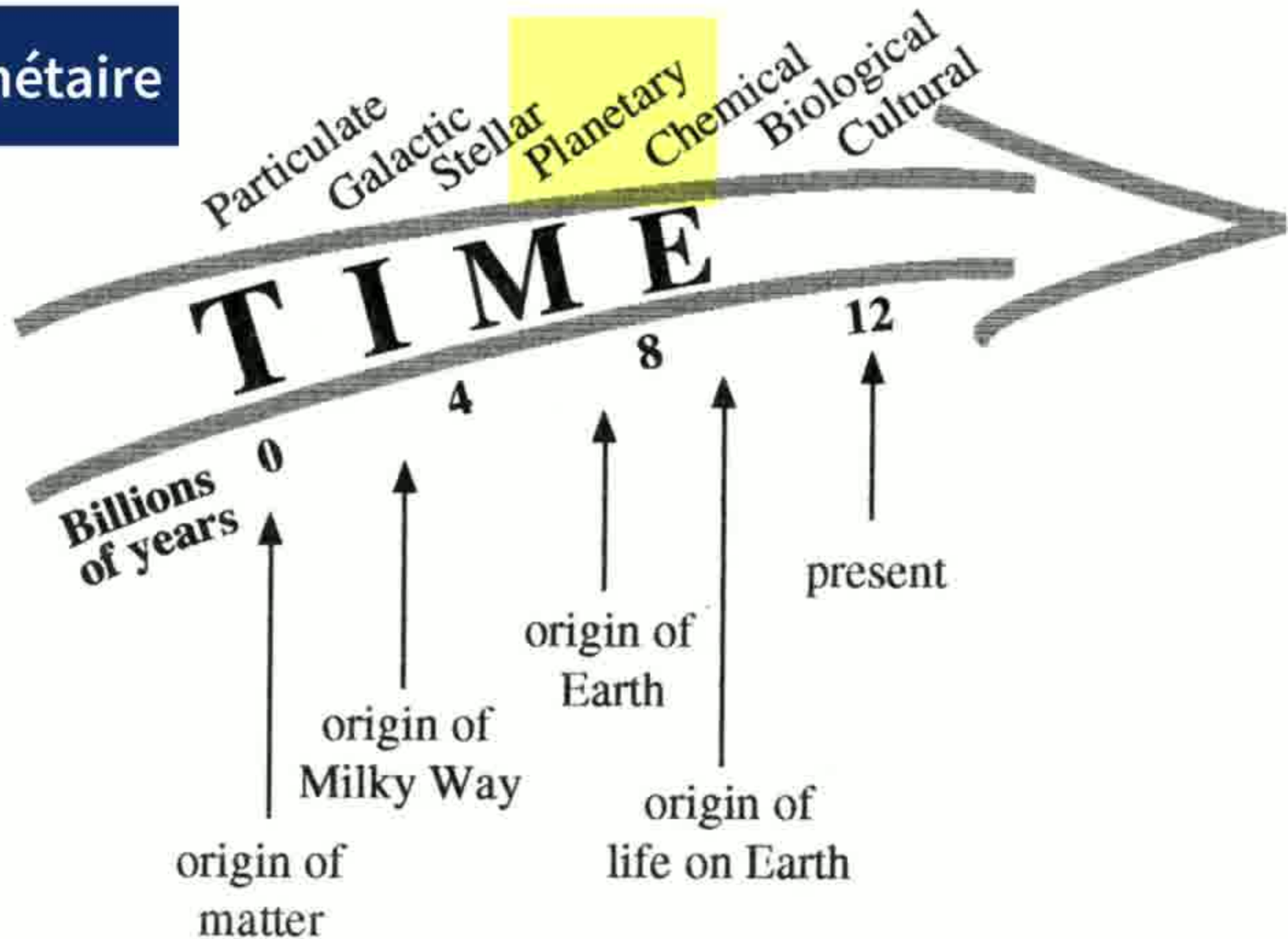
Étoile en
formation

Nuages
moléculaires

La composition chimique de l'univers change ...



La phase planétaire



La phase planétaire



Terre

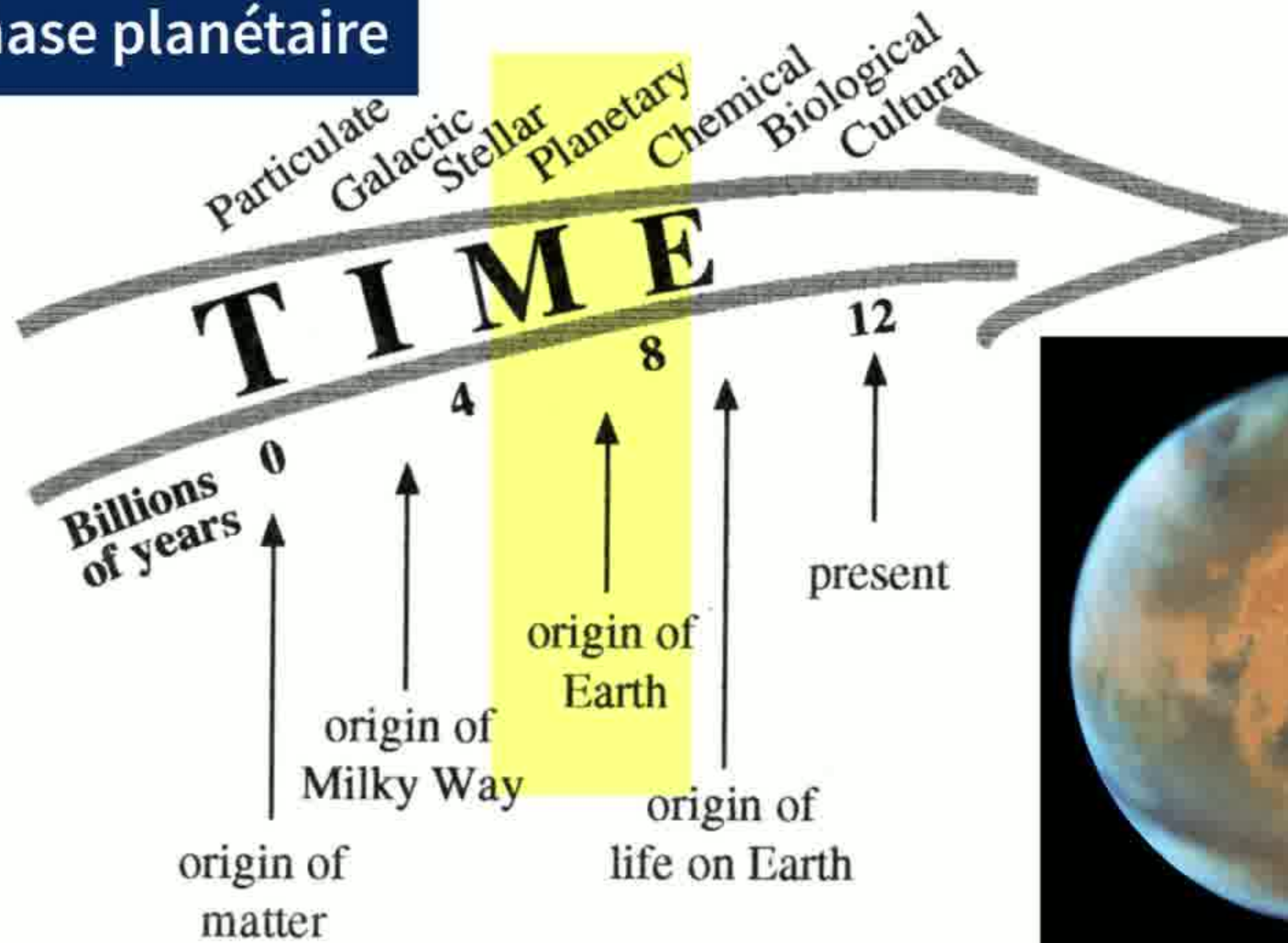


Uranus

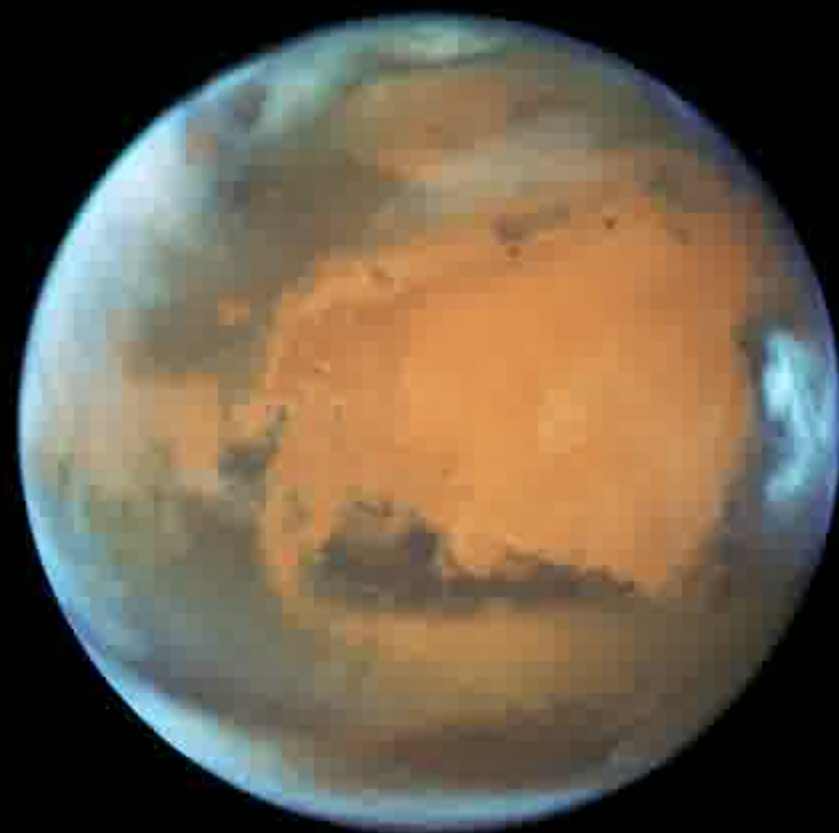


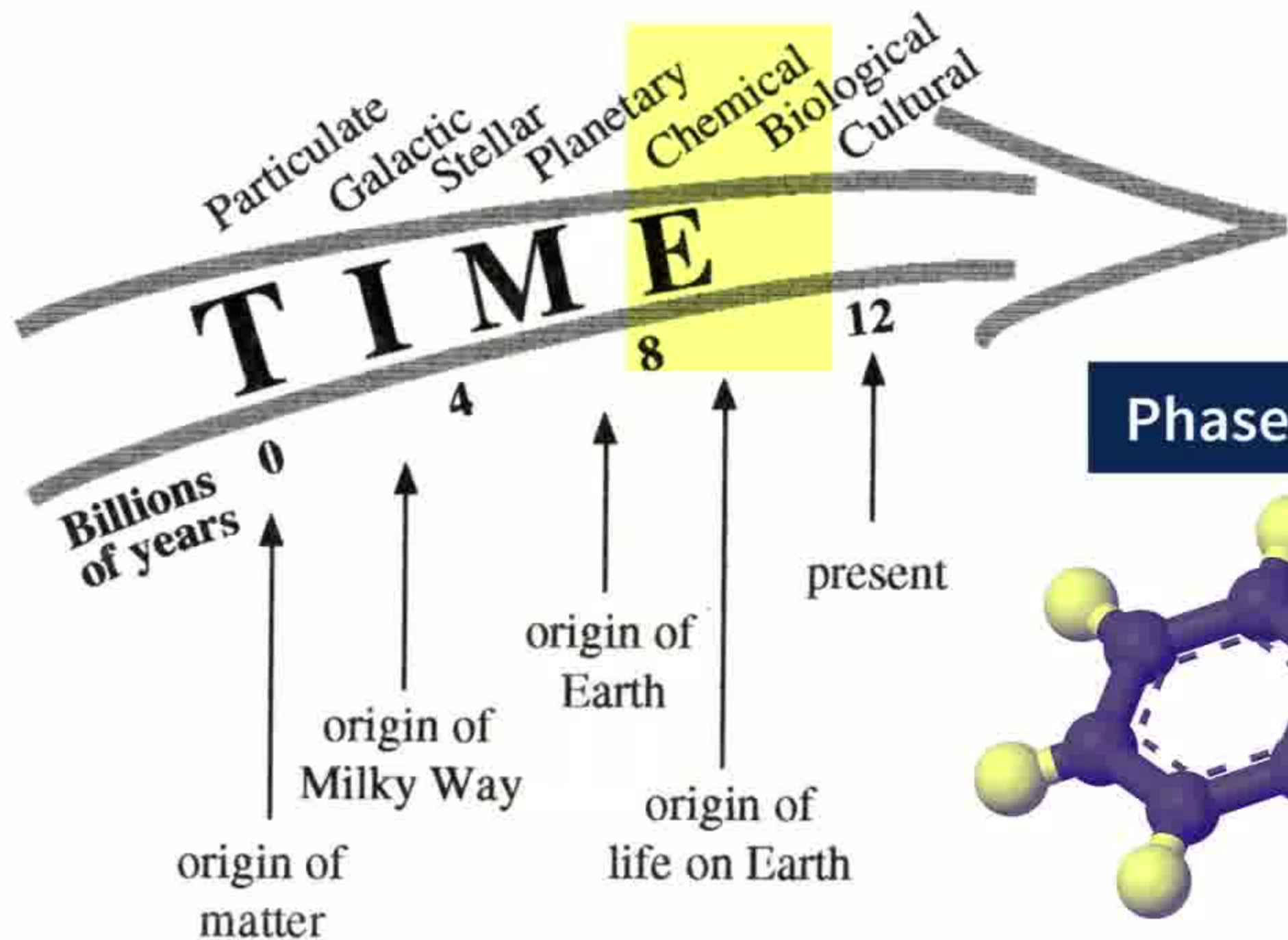
Jupiter

Phase planétaire

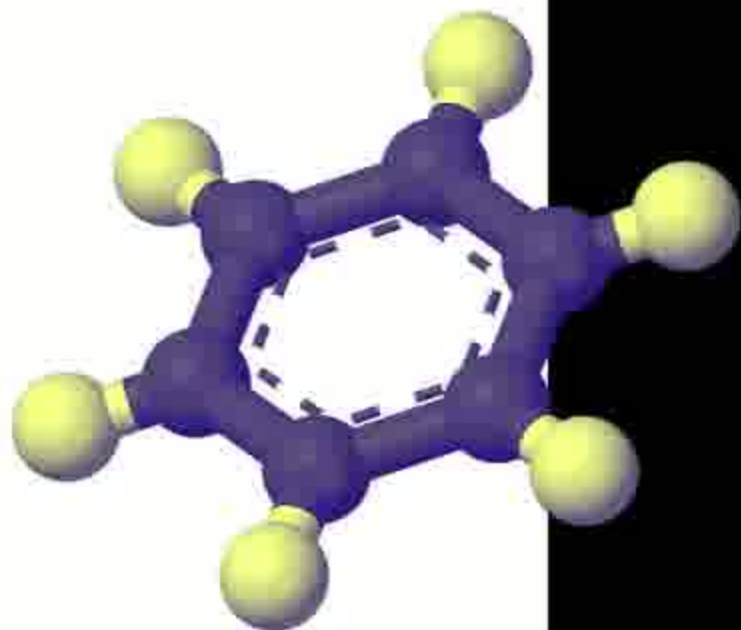


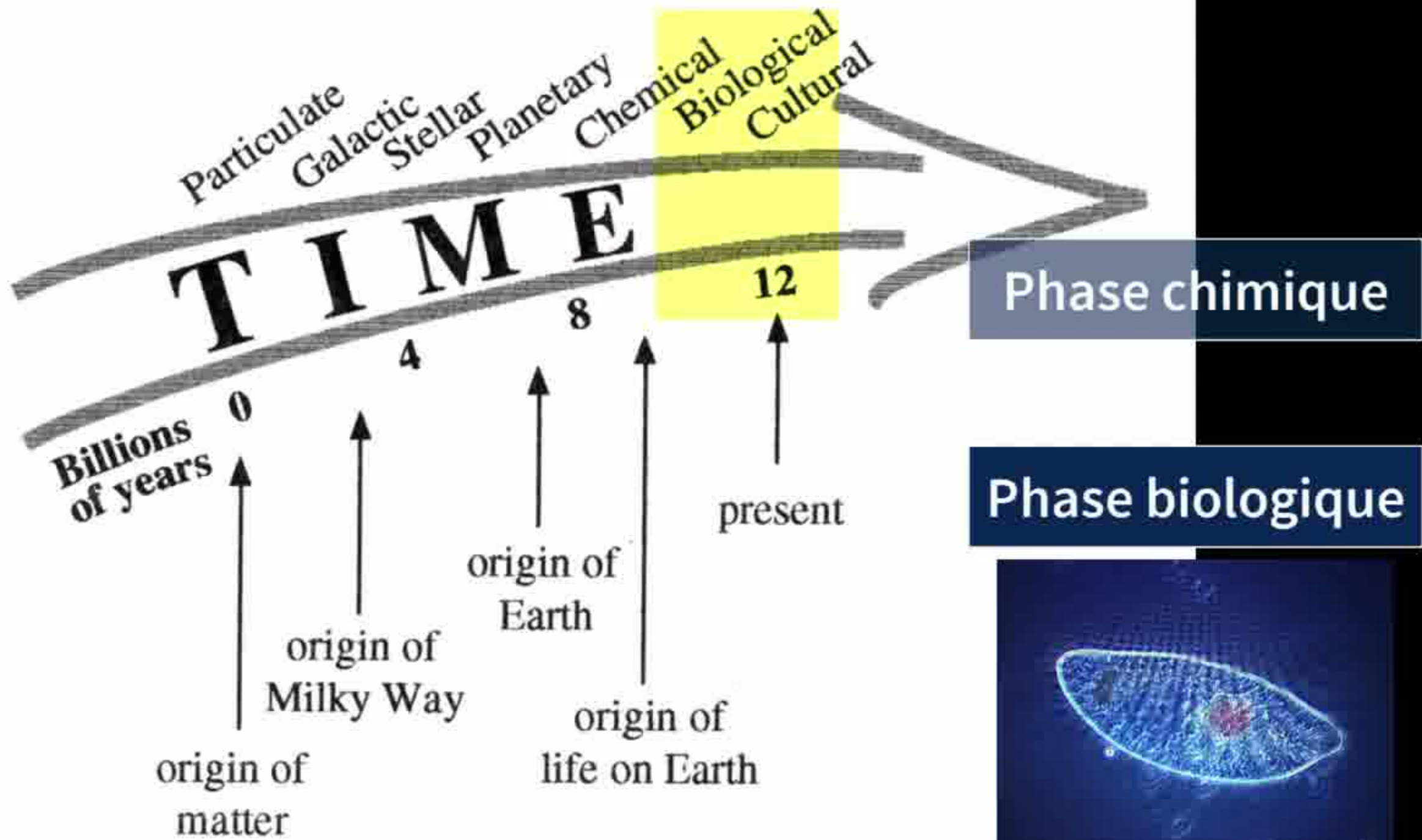
Mars

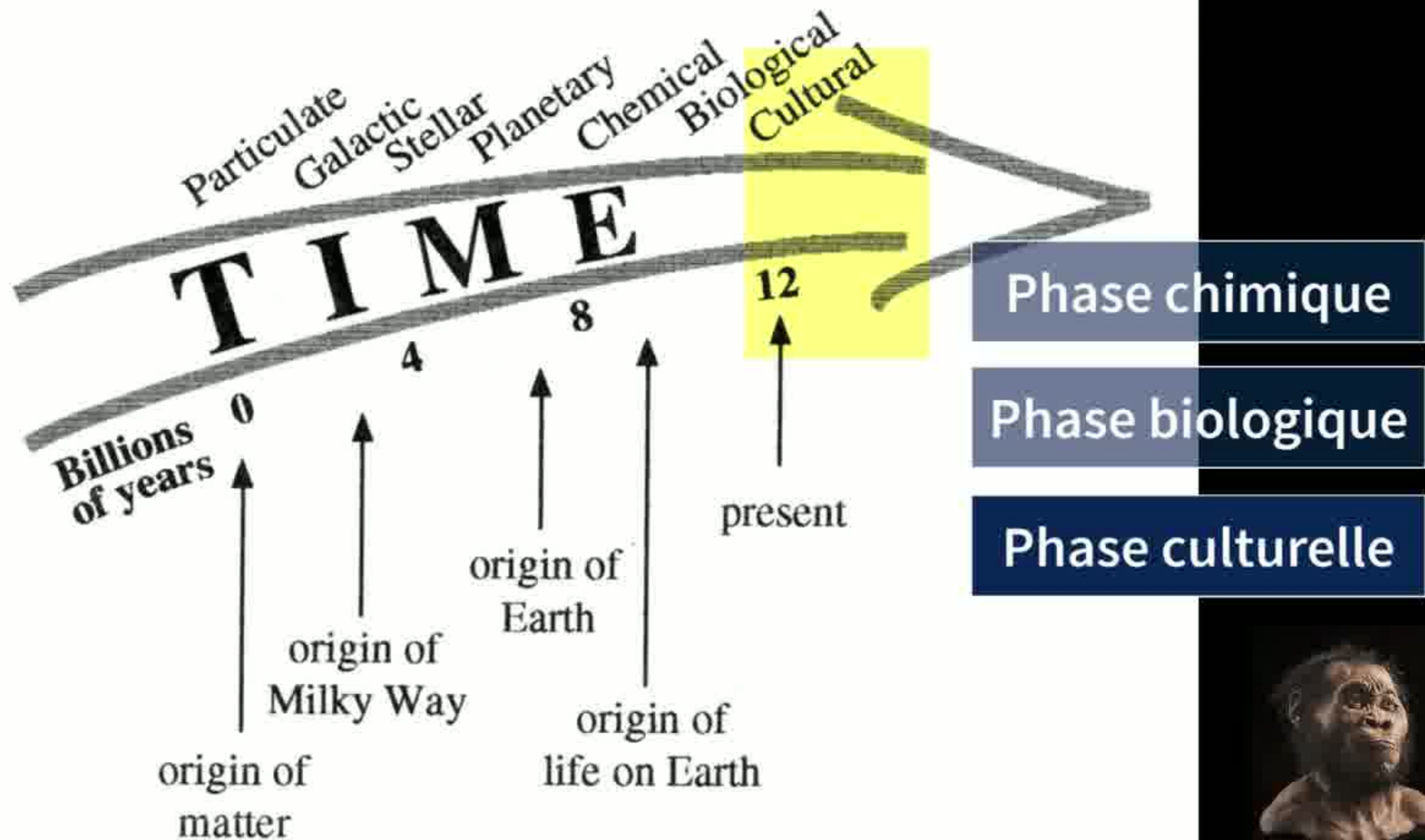


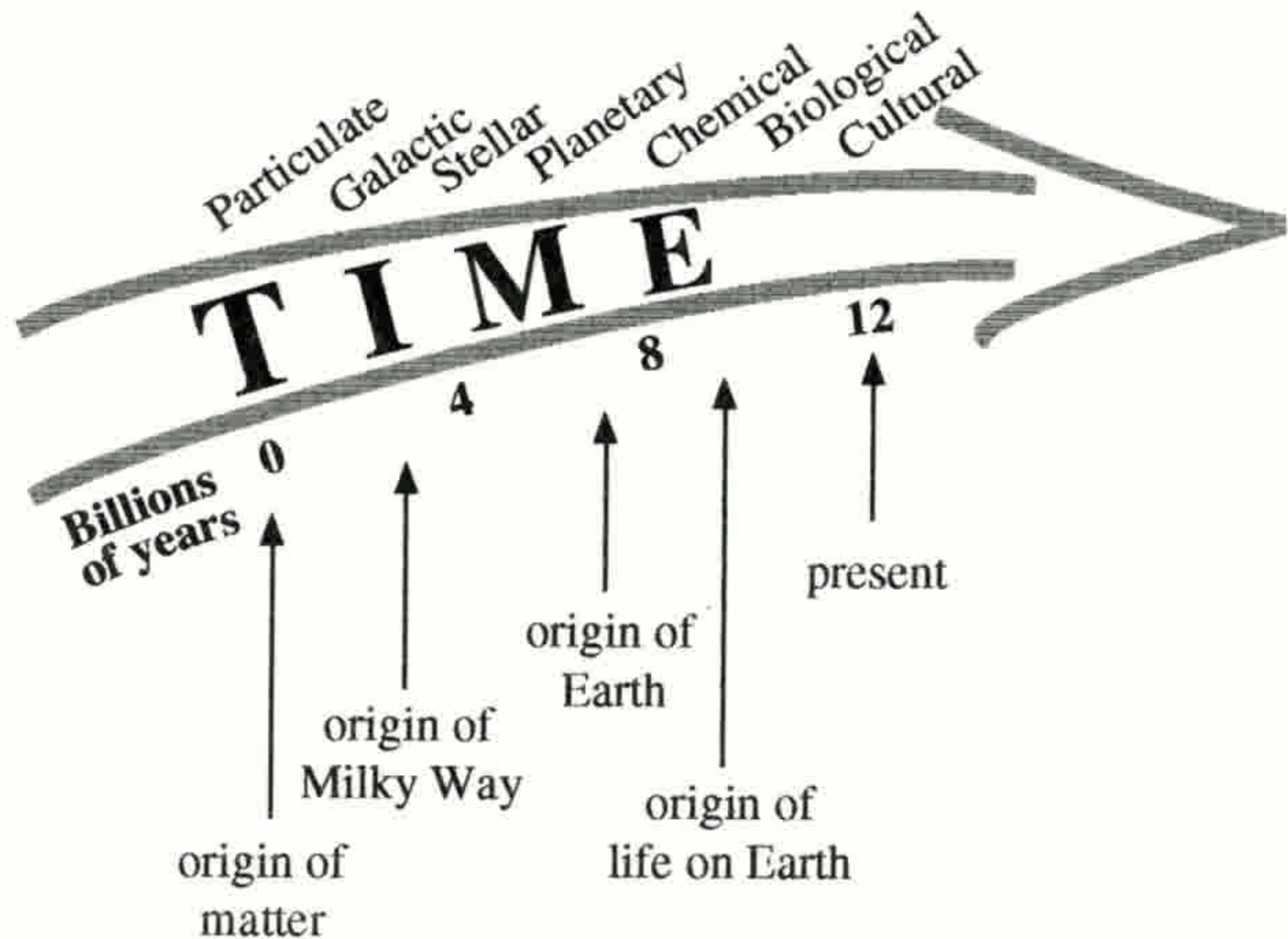


Phase chimique





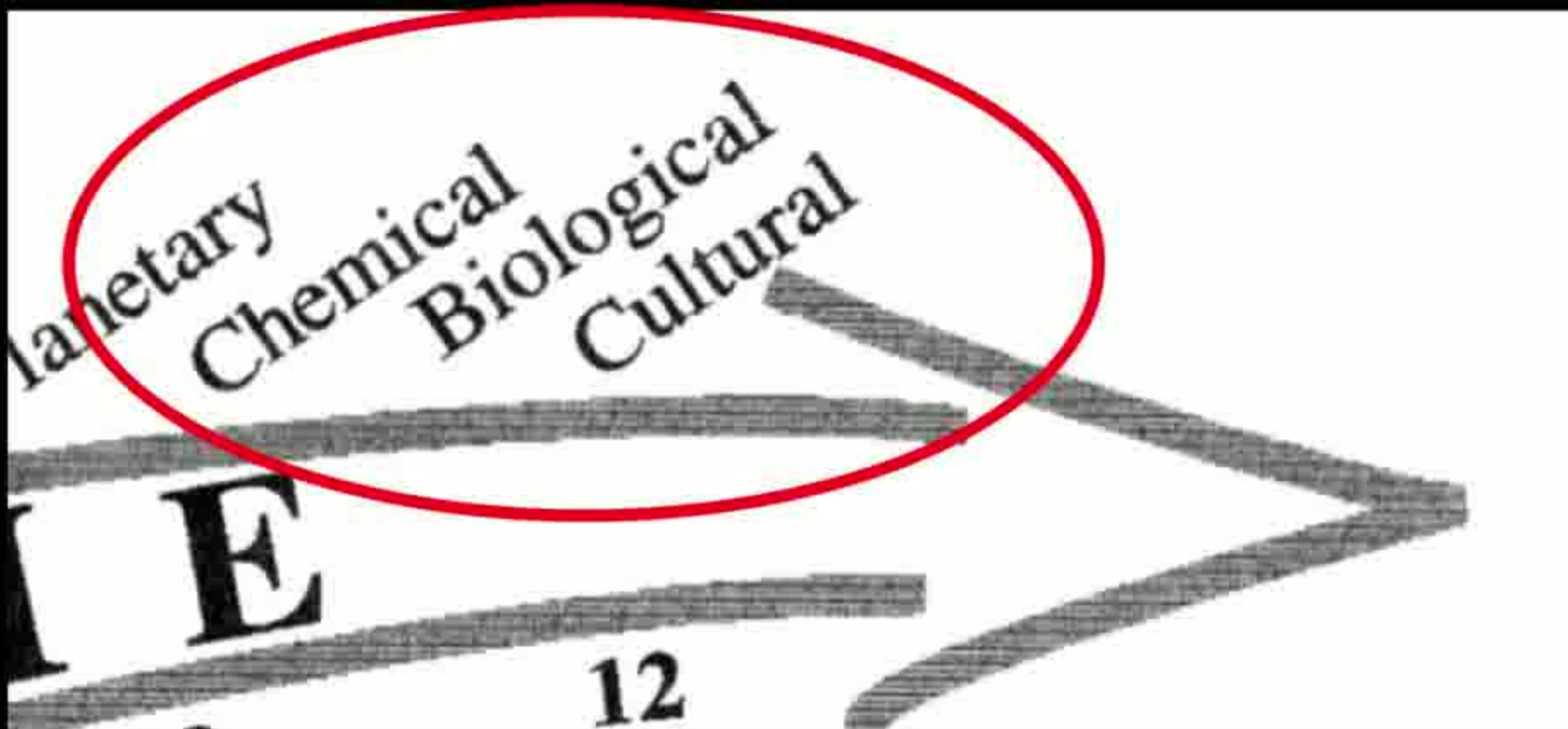






Eric Chaisson

Structures dissipatives



Énergie

Entropie







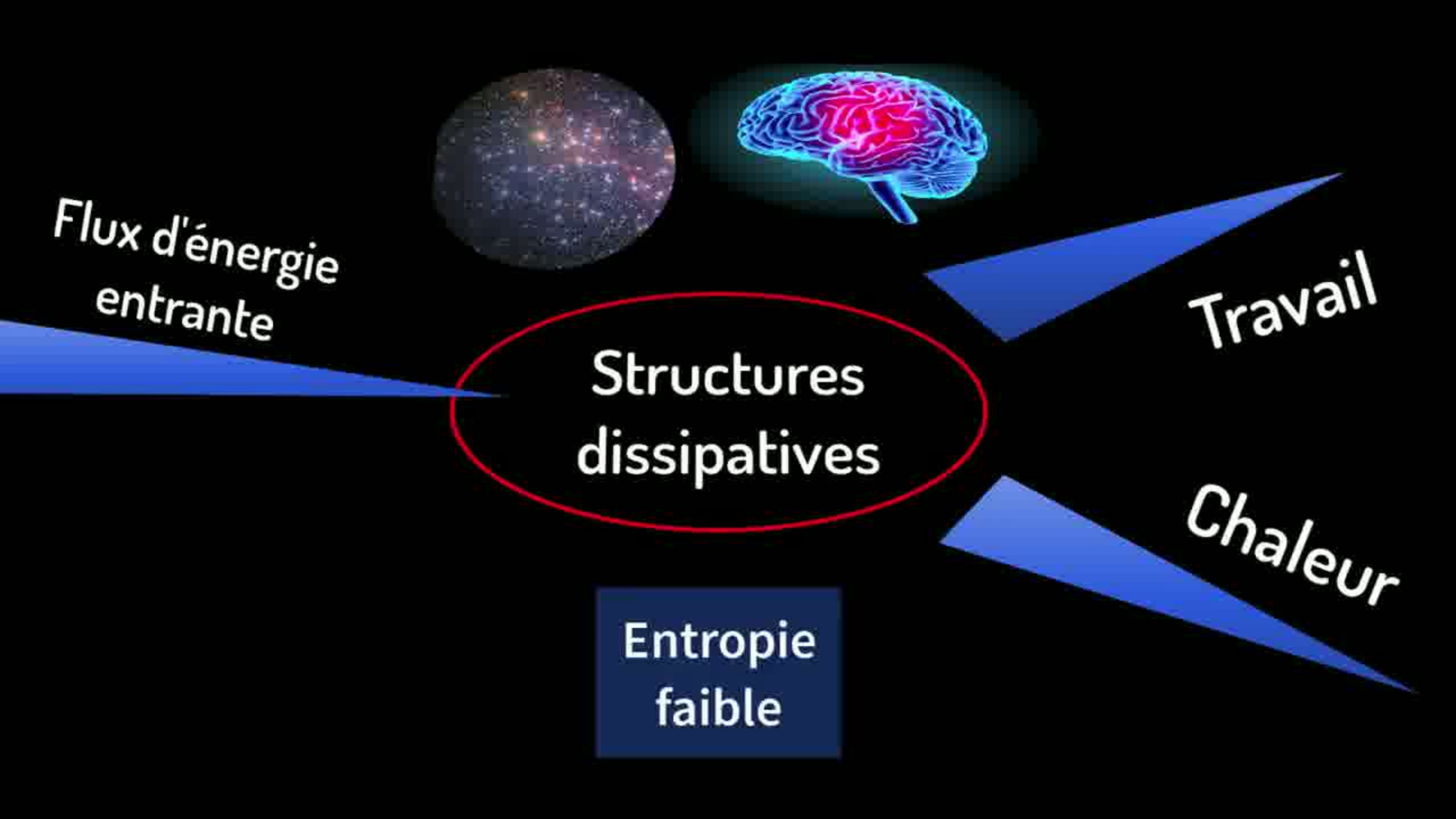






Structures dissipatives





Que signifie
"faible entropie"
pour toutes ces
entités
complexes ?



Que signifie
"faible entropie"
pour toutes ces
entités
complexes ?



"Faible entropie" signifie
"complexité"



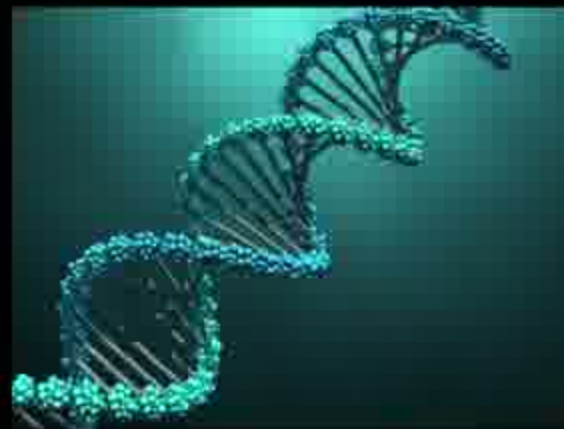
Entropie faible



Complexité



Information et
connaissances



Vers des entités de
plus en plus complexes



-7

-8

-9

-10

-11

-12

Matter-dominated
era

← Alpha Centauri
← NGC 188 star cluster

← Milky Way spirals

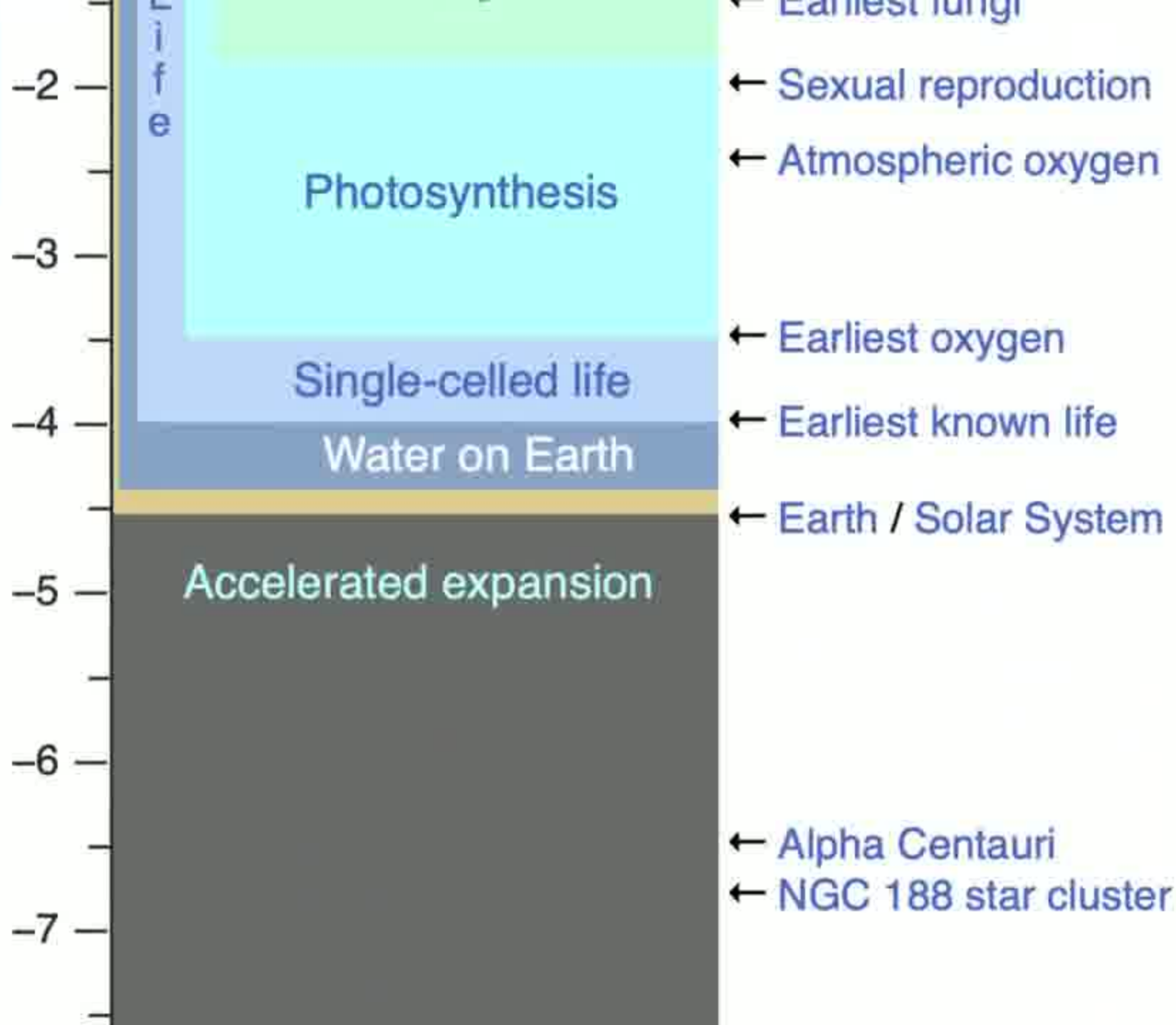
← Andromeda Galaxy

← Omega Centauri

Vers des entités de
plus en plus complexes



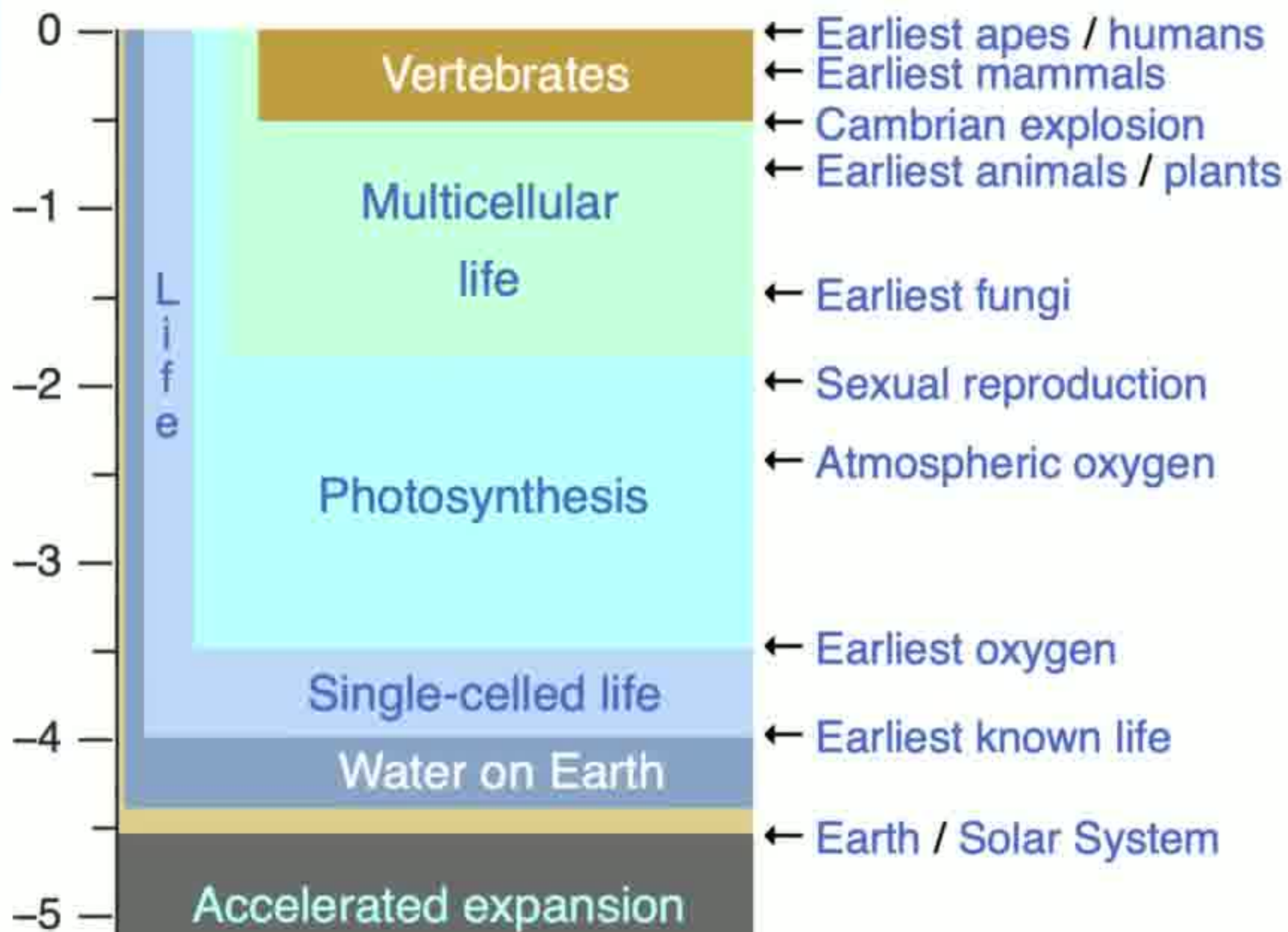
Vers des entités de plus en plus complexes



Vers des entités de plus en plus complexes



This box: [view](#) • [talk](#) • [edit](#)

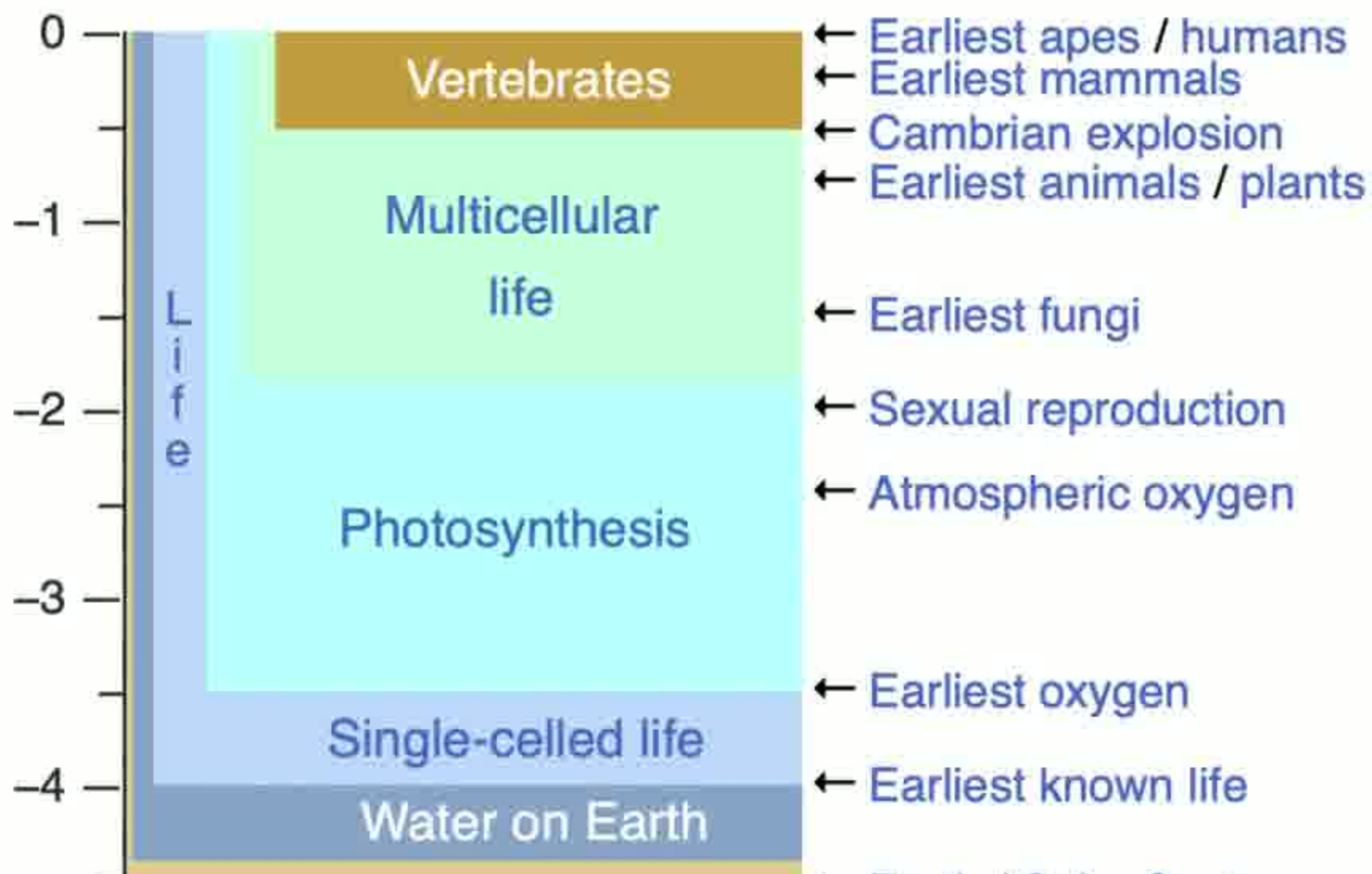


Vers des entités de plus en plus complexes



Nature timeline

This box: [view](#) • [talk](#) • [edit](#)



La complexité se transmet par ...



La complexité se transmet par ...

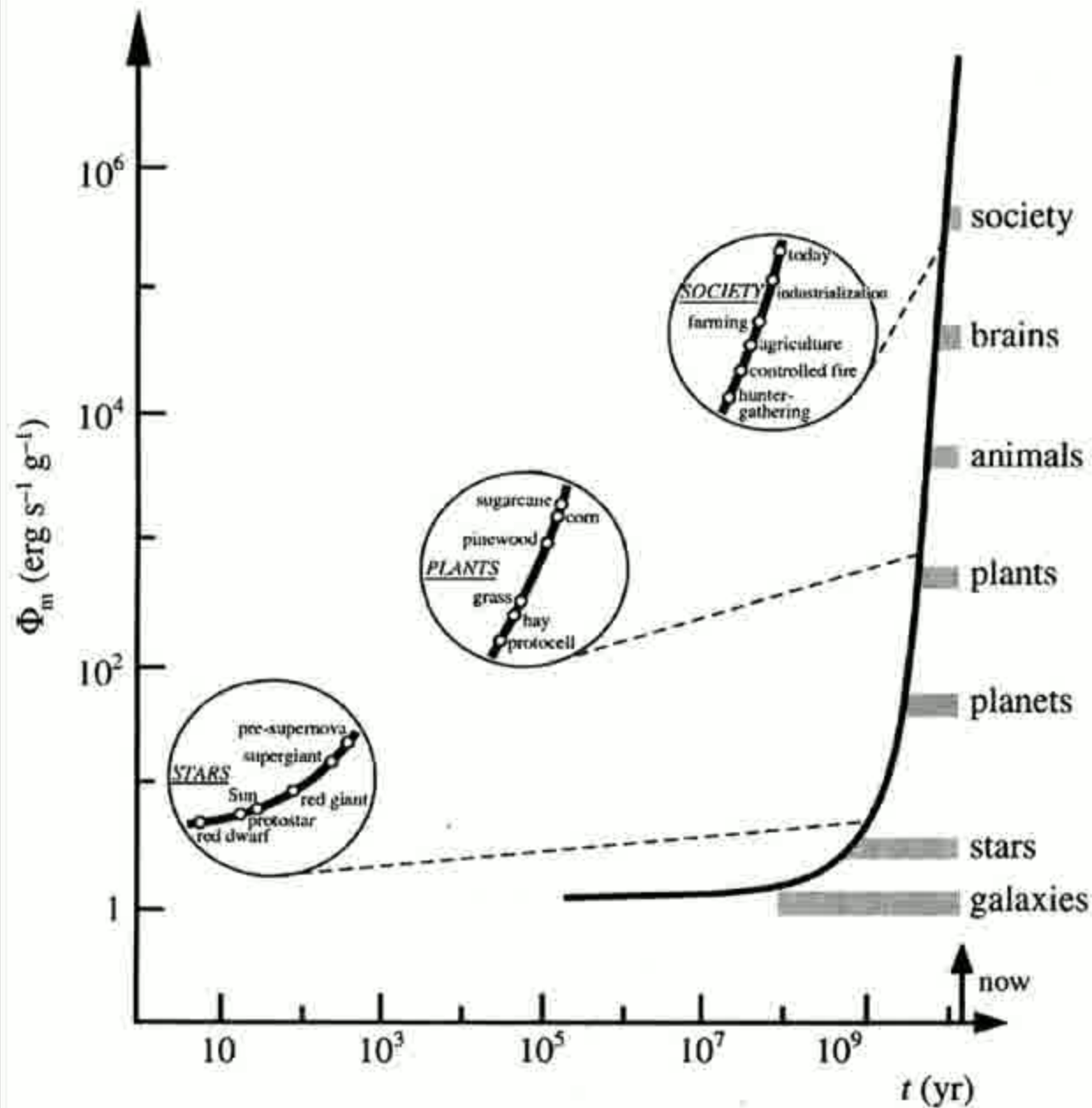


le patrimoine génétique

La complexité se transmet par ...

la culture





Une complexité qui se mesure en termes de quantité et de flux d'énergie