



UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE  
FACULTÉ DES SCIENCES  
Département d'astronomie

## Cosmologie

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

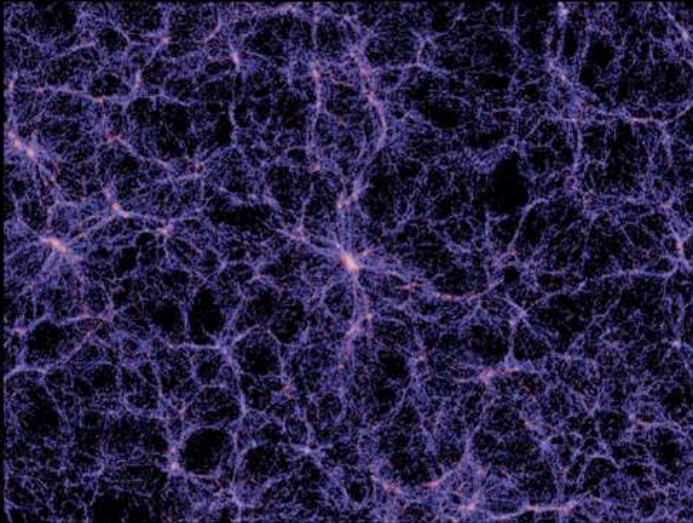


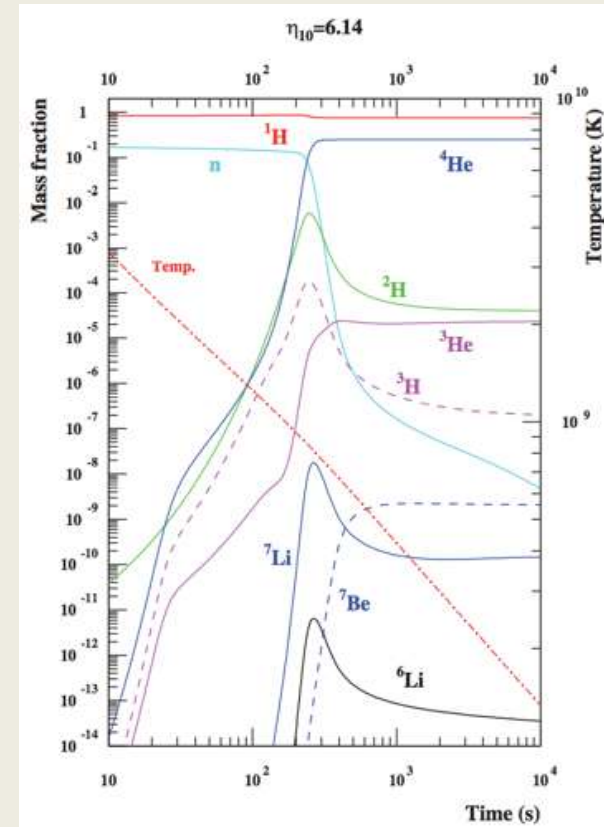
Image : OMBL, MPA, V. Springel/Max Planck Institute for Astrophysics

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

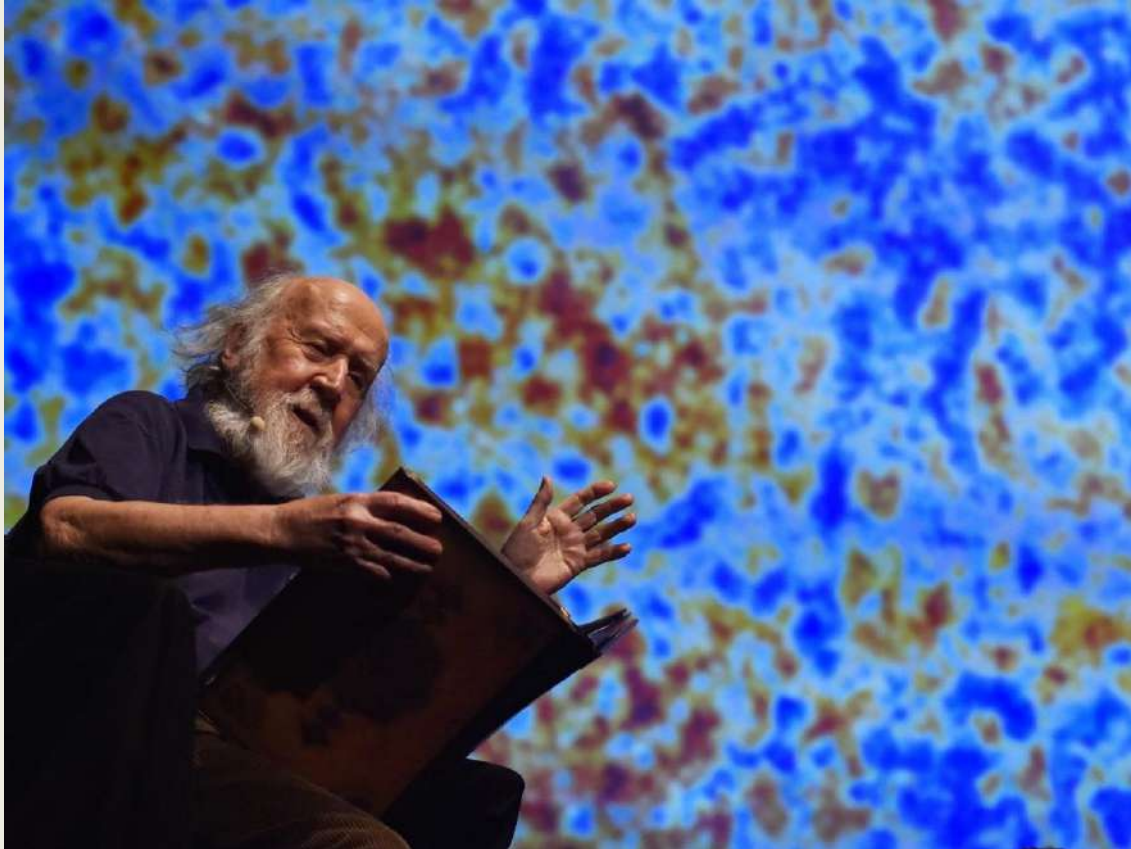
Inscription au cours sur place le 19 septembre  
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 6 – 24 octobre 2023

## Nucléosynthèse primordiale



Cf lecture 7 cosmologie P.Oesch



« Patience, patience,  
Patience dans l'azur !  
Chaque atome de silence  
Est la chance d'un fruit mûr !

Paul Valéry, étendu sur le sable chaud d'une lagune, regarde le ciel. Dans son champ de vision, des palmiers se balancent mollement, mûrissant leurs fruits. Il est à l'écoute du temps qui sourdement fait son œuvre. Cette écoute, on peut l'appliquer à l'univers. Au fil du temps se déroule la gestation cosmique. A chaque seconde, l'univers prépare quelque chose. Il monte lentement les marches de la complexité. » **Hubert Reeves**

# Origine des éléments chimiques

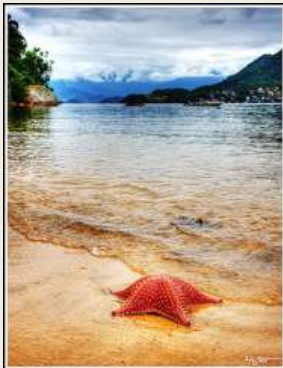
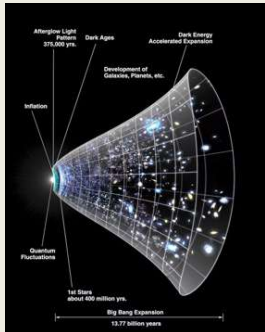


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne		
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu		

big bang fusion, cosmic ray fission, merging neutron stars, exploding massive stars, dying low mass stars, exploding white dwarfs

Very radioactive isotopes; nothing left from stars

Graphic created by Jennifer Johnson  
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~laj/nucleo/>  
 Astronomical Image Credits: ESA/NASA/AASNOVA



# Sites astrophysiques pour la nucléosynthèse

**REVIEWS OF  
MODERN PHYSICS**

---

VOLUME 29, NUMBER 4 OCTOBER, 1957

---

**Synthesis of the Elements in Stars\***

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and  
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,  
California Institute of Technology, Pasadena, California*

"It is the stars, The stars above us, govern our conditions";  
*(King Lear, Act IV, Scene 3)*

but perhaps

"The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,"  
*(Julius Caesar, Act I, Scene 2)*

**TABLE OF CONTENTS**

	Page
I. Introduction	548
A. Element Abundances and Nuclear Structure	548
B. Four Theories of the Origin of the Elements	550
C. General Features of Stellar Synthesis	550
II. Physical Processes Involved in Stellar Synthesis, Their Place of Occurrence, and the Time-Scales Associated with Them	551
A. Modes of Element Synthesis	551
B. Method of Assignment of Isotopes among Processes (i) to (viii)	553
C. Abundances and Synthesis Assignments Given in the Appendix	555
D. Time-Scales for Different Modes of Synthesis	556
III. Hydrogen Burning, Helium Burning, the $\alpha$ Process, and Neutron Production	559
A. Cross-Section Factor and Reaction Rates	559
B. Pure Hydrogen Burning	562
C. Pure Helium Burning	565
D. $\alpha$ Process	567
E. Succession of Nuclear Fuels in an Evolving Star	568
F. Burning of Hydrogen and Helium with Mixtures of Other Elements; Stellar Neutron Sources	569
IV. $s$ Process	577
V. $s$ and $r$ Processes: General Considerations	580
A. "Shielded" and "Shielding" Isobars and the $s$ , $r$ , $p$ Processes	580
B. Neutron-Capture Cross Sections	581
C. General Dynamics of the $s$ and $r$ Processes	583
VI. Details of the $s$ Process	583

\* Supported in part by the joint program of the Office of Naval Research and the U. S. Atomic Energy Commission.

547

Copyright © 1957 by the American Physical Society



**Big Bang**

Gamov

Univers en expansion – Big Bang de Lemaitre



**Rayons cosmiques**

Reeves

## Etoiles

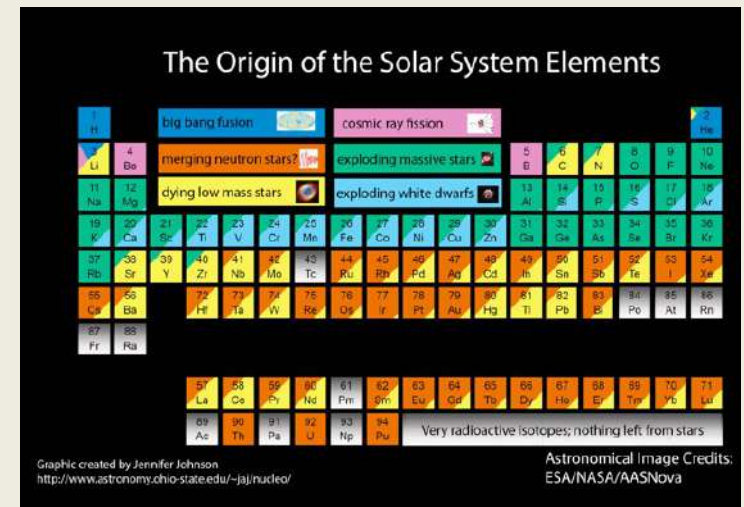
Bethe 1939 CNO – Nobel physique 1967

Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle B2FH 1957

Fowler & Salpeter – 3-alpha

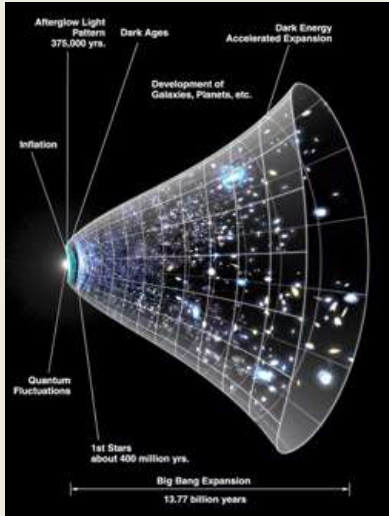
Hoyle – Univers « stationnaire »

Fowler (expérimentaliste) – Nobel physique 1985



# Histoire thermique de l'univers

## Modèle du Big Bang chaud



George Gamov  
« Expanding universe and the origin of elements »  
(1946 Phys.Review)

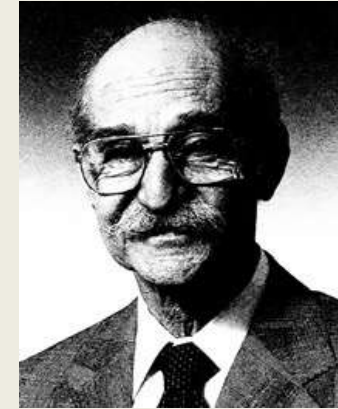


Ralph Alpher



Hans Bethe

(CNO – Bethe-Feynman fission – projet Manhattan)



Robert Herman

« The origin of chemical elements » (1948 ABG)

« Physical Conditions in the Initial Stages of the Expanding Universe »  
(Alpher, Herman, Follin 1953 Phys.Review)



Lemaitre

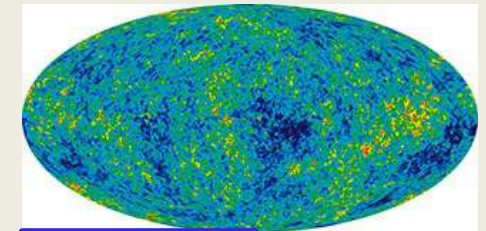
Expansion rapide de l'univers

- Evolution de la densité et de la température de la matière, depuis aujourd'hui et en remontant dans le passé
- Pression, densité et température augmentent
- Molécules et atomes brisés en leurs constituants
- Particules élémentaires

(“the primordial substance from which the elements were formed”)

→ « **The word began in 5 minutes** » (1948)

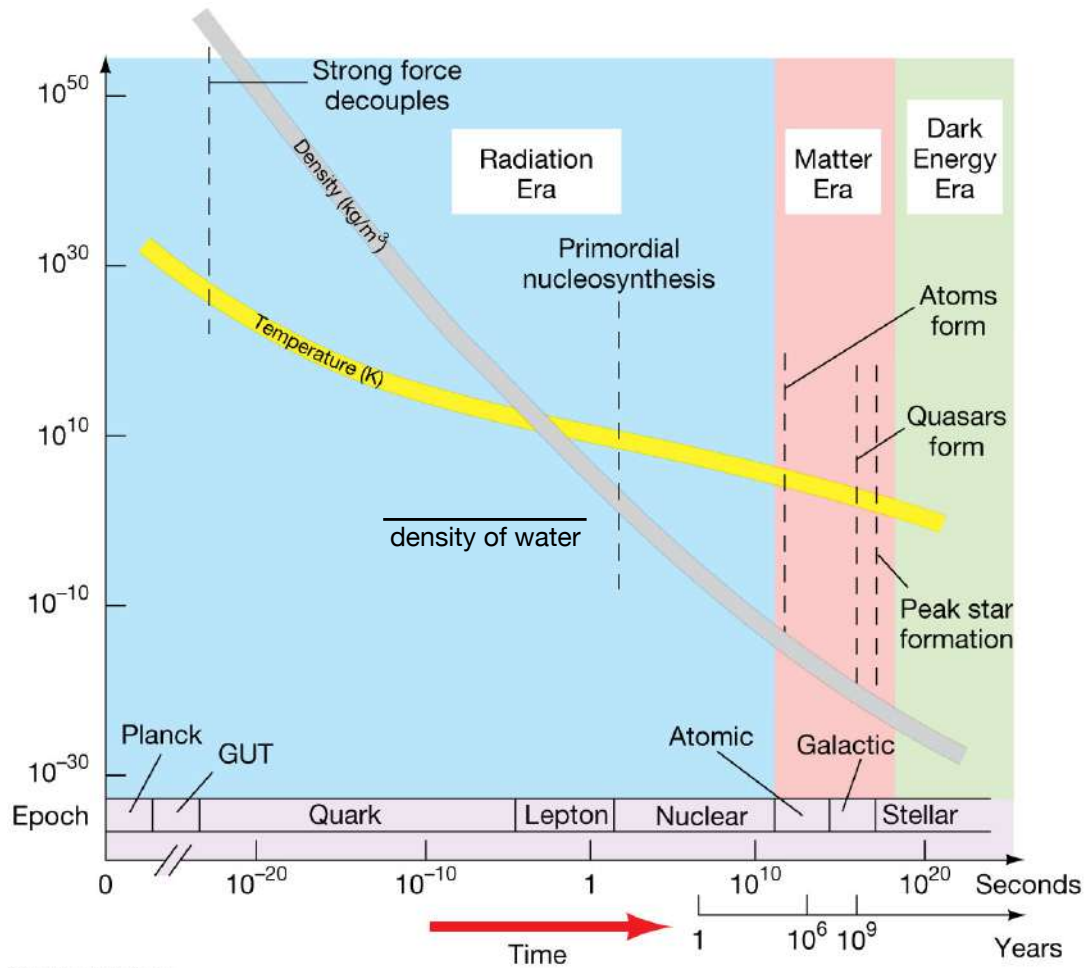
En plus de la matière, l'énergie de la lumière joue un rôle important



(leçon 20231017 SP)

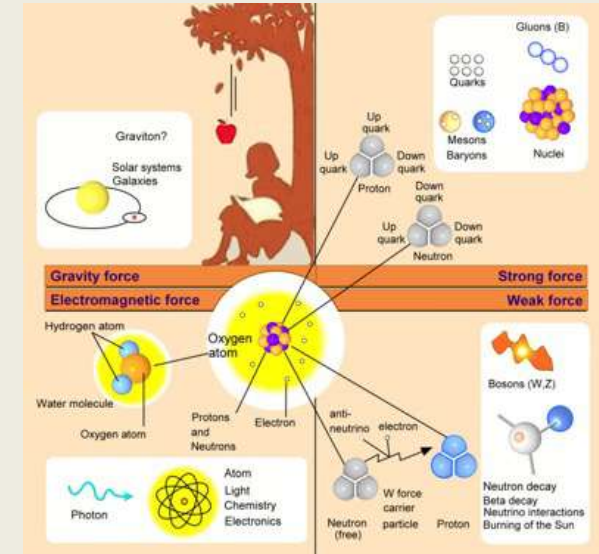
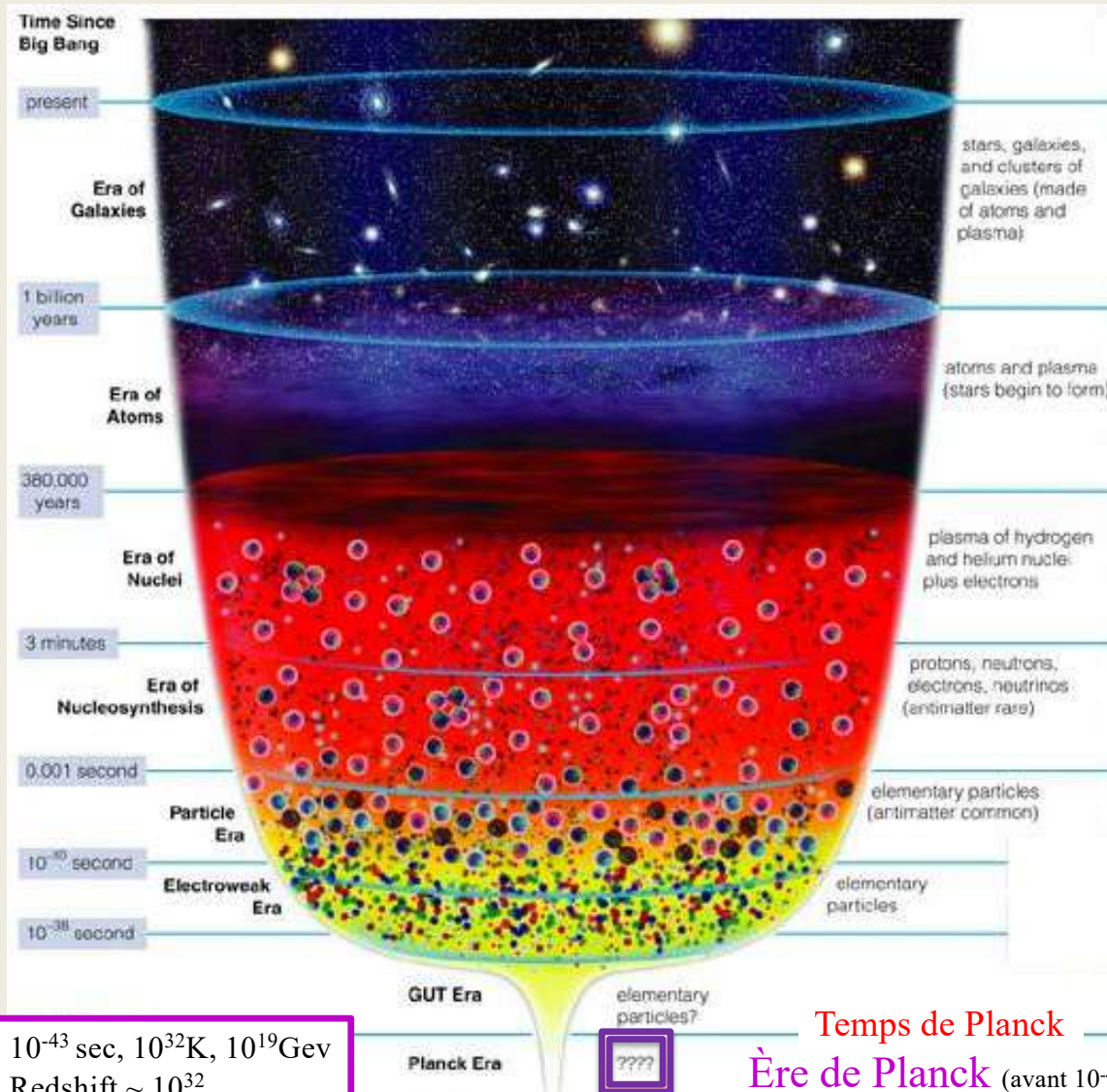
TABLE IV. Timetable of events in the early epochs of the expanding universe.

Temperature (Mev)	Remarks	
	Neutrino = antineutrino	Neutrino ≠ antineutrino
>100	Region of doubtful validity of the field equations where $\rho_\gamma$ exceeds nuclear density.	
~100	Thermodynamic equilibrium prevails.	
	$\rho_\gamma \cong 1.2 \times 10^{13}$ g/cm <sup>3</sup> $\rho_\mu = (7/4)\rho_\gamma$ , $\rho_\pi = (3/2)\rho_\gamma$ $\rho_e = (7/8)\rho_\gamma$ , $\rho_\nu = (7/4)\rho_\gamma$ $t \cong 6.3 \times 10^{-3}$ sec	Same as for $\nu = \bar{\nu}$ except $\rho_\nu = (7/4)\rho_\gamma$ $t \cong 5.9 \times 10^{-3}$ sec
~100—~10	Mesons annihilate converting energy into photons, electrons, and neutrinos.	
~10	Neutrinos are freezing-in during this period.	
	$\rho_\gamma \cong 1.2 \times 10^9$ g/cm <sup>3</sup> $\rho_\mu \sim 10^{-6}\rho_\gamma$ , $\rho_\pi \sim 10^{-6}\rho_\gamma$ $\rho_e = (7/8)\rho_\gamma$ , $\rho_\nu = (7/4)\rho_\gamma$ $t \cong 8.7 \times 10^{-2}$ sec	Same as for $\nu = \bar{\nu}$ except $\rho_\nu = (7/4)\rho_\gamma$ $t \cong 7.8 \times 10^{-2}$ sec
~10—~2	Continued adiabatic expansion of universe with $T_\nu \cong T$ despite negligible interaction of neutrinos with medium.	
~2	Start of electron-positron annihilation.	
	$\rho_\gamma \cong 1.9 \times 10^8$ g/cm <sup>3</sup> $\rho_\mu = \rho_\pi \sim 0$ $\rho_e \cong (7/8)\rho_\gamma$ , $\rho_\nu = (7/4)\rho_\gamma$ $t \cong 0.22$ sec	Same as $\nu = \bar{\nu}$ except $\rho_\nu \cong (7/4)\rho_\gamma$ $t \cong 0.20$ sec
~2—~0.05	Electron-positron annihilation, converting energy into photons. Neutrinos cool adiabatically relative to remaining particles, the latter maintaining thermodynamic equilibrium. [See Tables I and II for more details during this epoch.] The neutron-proton abundance ratio reaches the free decay value, 4.5:1—6.0:1, at $T \sim 0.2$ Mev. Nucleogenesis begins at $T \sim 0.2$ Mev.	
~0.05	Nucleogenesis is well under way.	
	$\rho_\gamma \cong 0.72$ g/cm <sup>3</sup> $\rho_e \cong 0.24\rho_\gamma$ , $\rho_\nu \sim 0$ $t \cong 600$ sec	$\rho_\gamma \cong 0.72$ g/cm <sup>3</sup> $\rho_e \cong 0.47\rho_\gamma$ , $\rho_\nu \sim 0$ $t \cong 550$ sec
~0.03	Nucleogenesis essentially complete except for charge adjustment by $\beta$ decay.	
	$t \sim 30$ min	
~0.03 Mev —~1 kev	Thermonuclear reactions among some of the light elements, viz., Li, Be, B, D with H, continue during this period.	
~0.015 ev	At $t \sim 10^8$ yr, $T \sim 170^\circ\text{K}$ and $\rho \sim 10^{-28}$ g/cm <sup>3</sup> , galaxies probably form.	



© 2011 Pearson Education, Inc.

# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



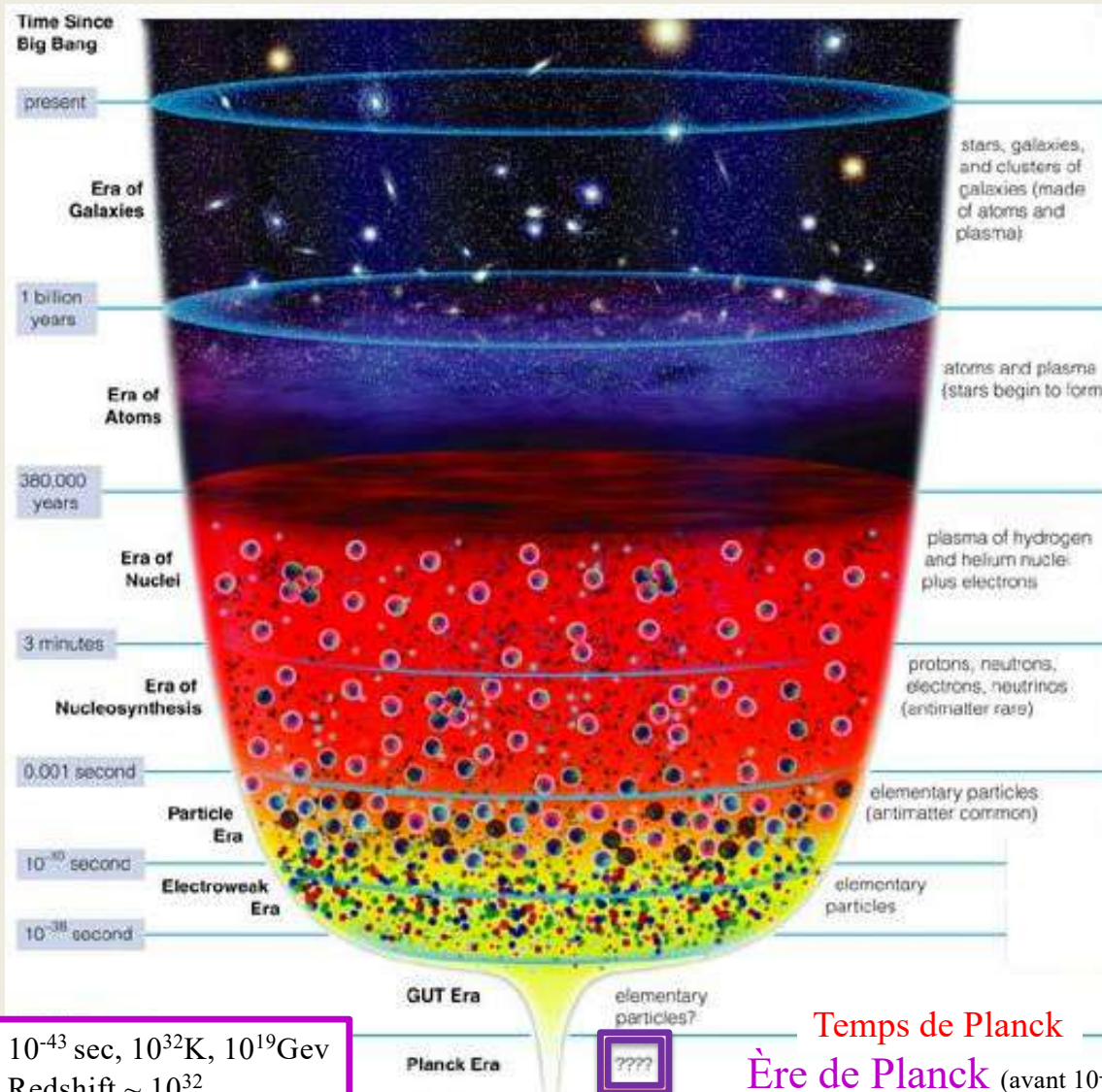
Aucune théorie actuelle ne décrit l'univers pendant l'ère de Planck. Nécessité d'une théorie décrivant les 4 interactions fondamentales (électromagnétisme, interaction nucléaire faible, interaction nucléaire forte, gravitation) de manière unifiée (i.e., théorie de la supersymétrie, théorie quantique de la gravitation, théorie quantique du vide, **théorie de la Grande Unification**). Une seule interaction gouvernant des particules/entités plus fondamentales que celles que nous connaissons?

(0) ~~Etat « initial »~~ Singularité, extrapolation des équations de la relativité générale qui ne décrit que la gravitation

Mur de Planck

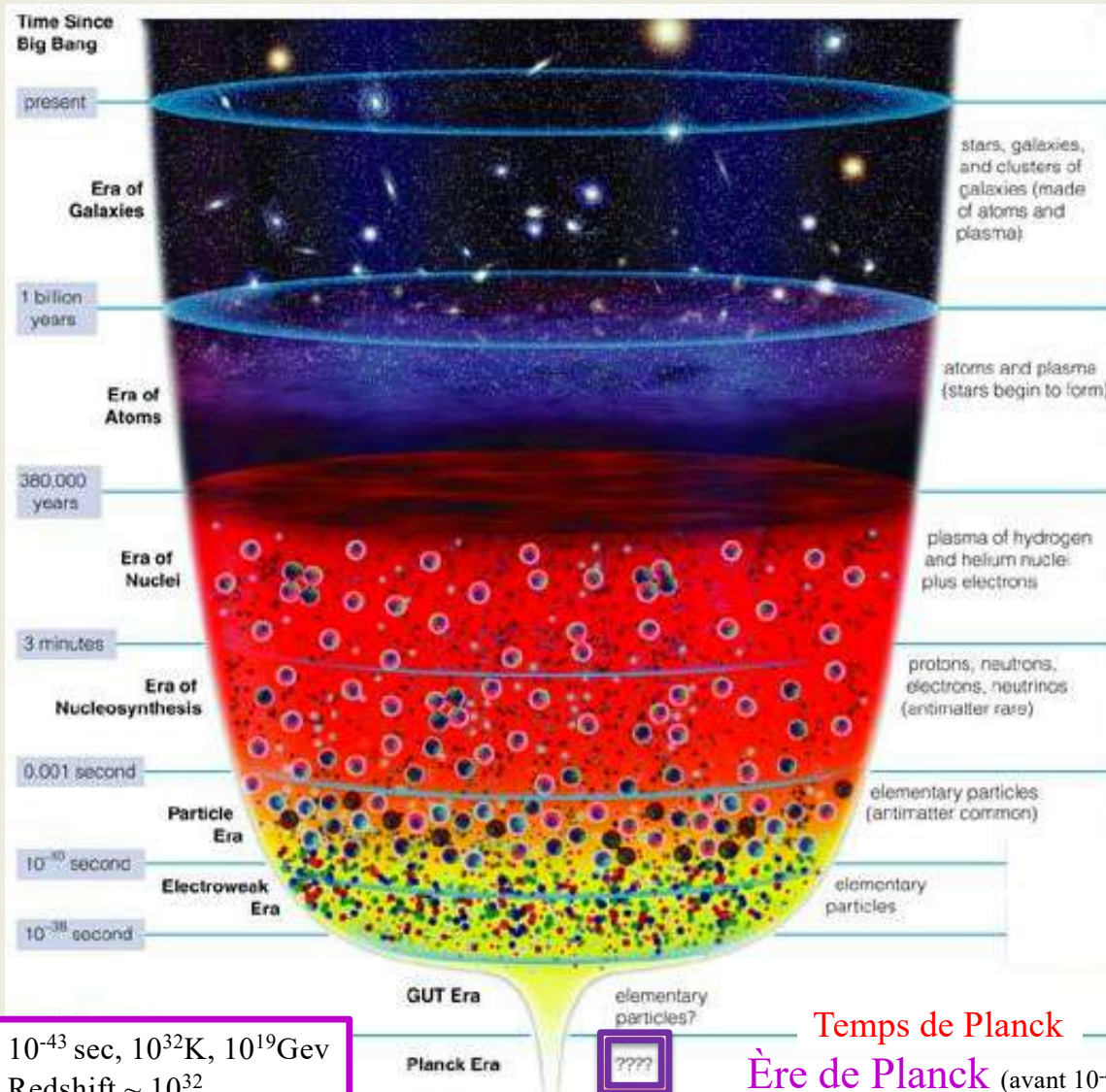


# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



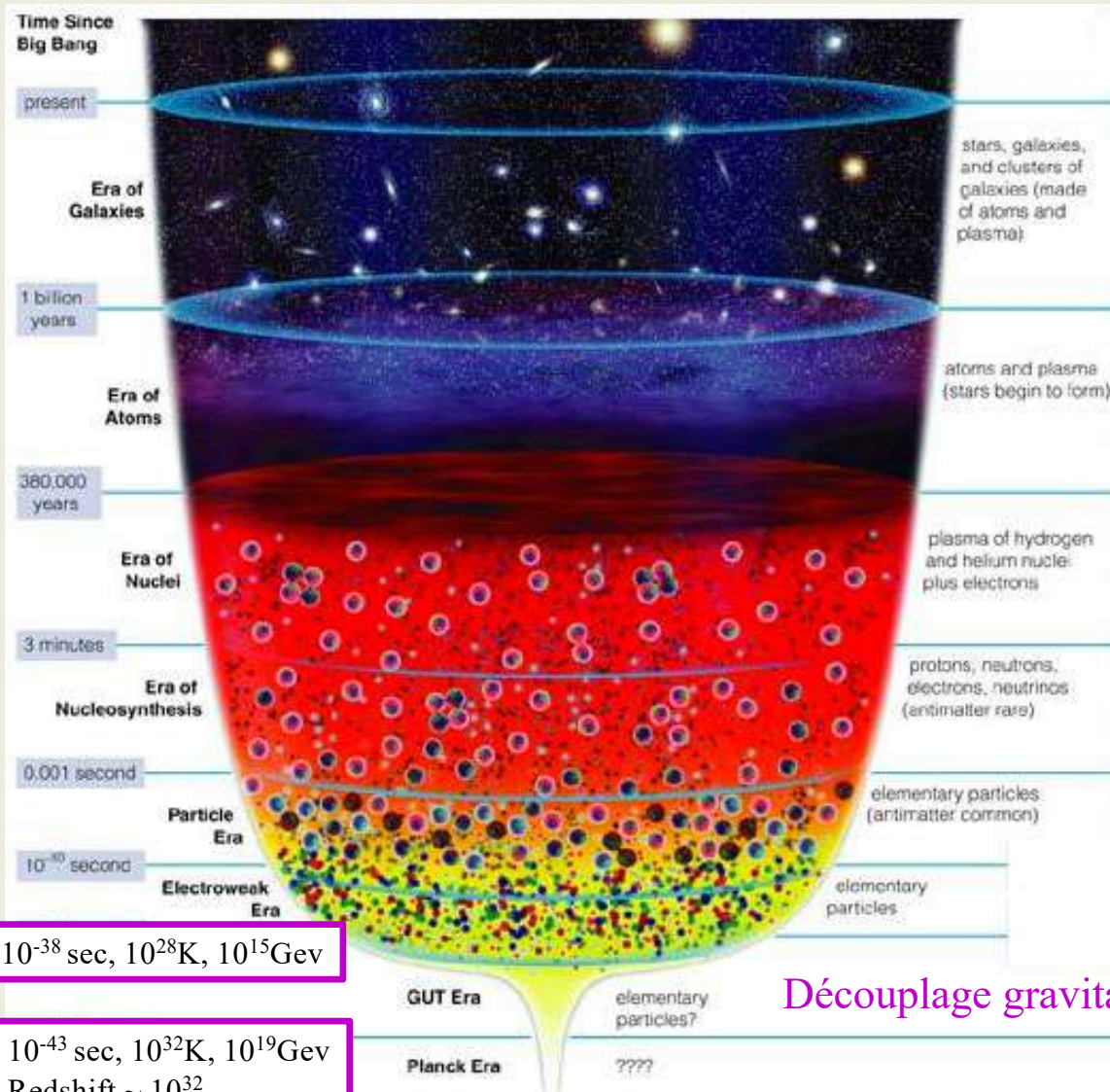
Hypothèse: plasma primordial (matière et rayonnement) en équilibre thermique ↔  $E_{cin}$  moyenne de toutes les particules est la même quelque soit leur masse;  $T$  mesure l' $E$  moyenne des particules  
Energie de Planck (10<sup>19</sup> GeV): Agitation thermique d'une hypothétique particule à la température de Planck (10<sup>32</sup> K)

# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



Hypothèse: plasma primordial (matière et rayonnement) en **ÉQUILIBRE THERMIQUE**  
 → Efface les propriétés antérieures de l'univers, rend les conditions initiales identiques à chaque « endroit »

# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



$10^{-38}$  sec,  $10^{28}$ K,  $10^{15}$ Gev

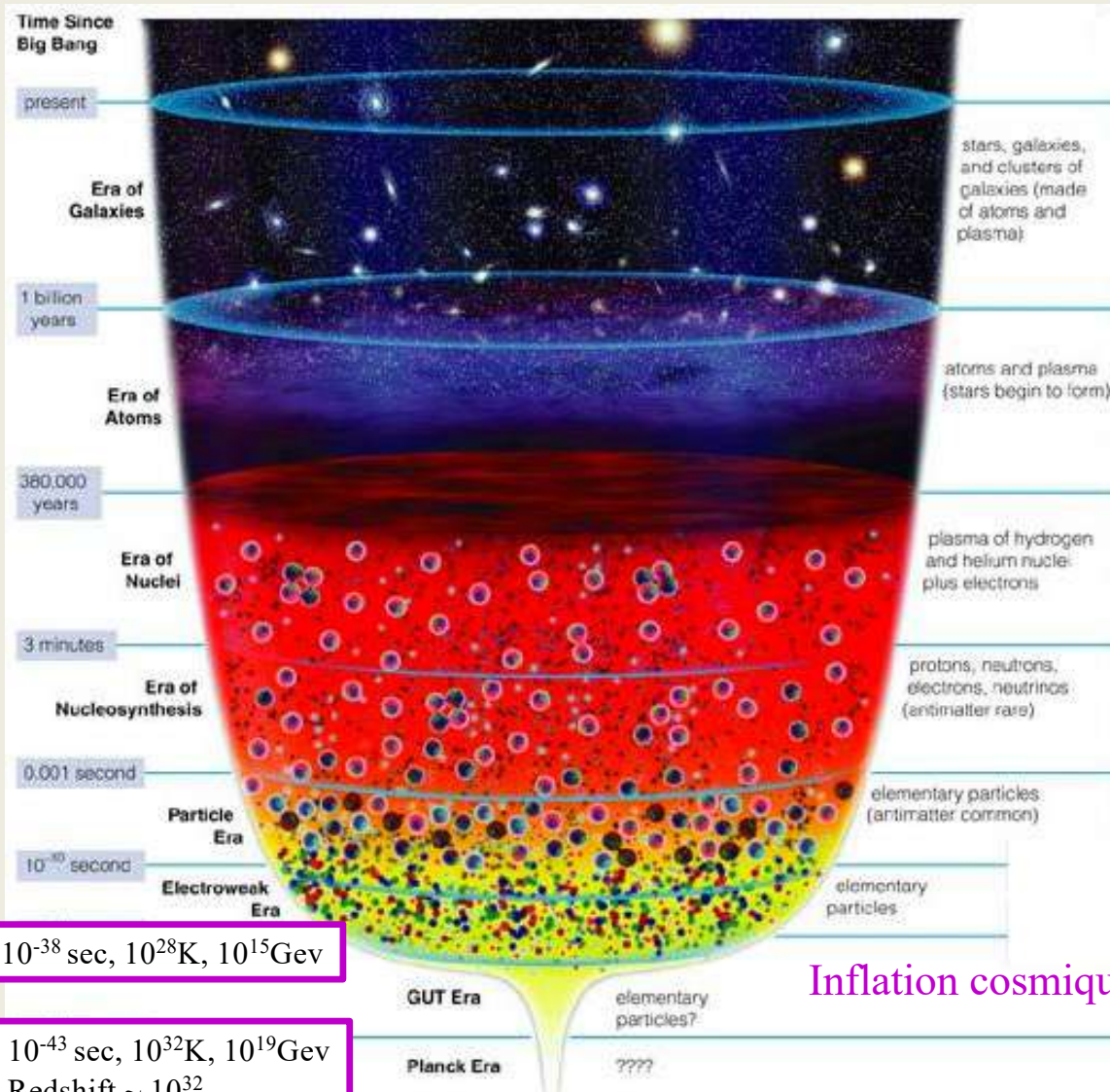
$10^{-43}$  sec,  $10^{32}$ K,  $10^{19}$ Gev  
Redshift  $\sim 10^{32}$

Découplage gravitationnel ( $10^{-43}$  à  $10^{-35}$  sec; redshift  $10^{32}$  à  $10^{27}$ )

L'interaction gravitationnelle devient plus faible que les 3 autres interactions fondamentales.

→ Fonds diffus d'ondes gravitationnelles formé par la radiation gravitationnelle (équivalent du CMB constitué d'ondes électromagnétiques)

# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



$10^{-38}$  sec,  $10^{28}$ K,  $10^{15}$ Gev

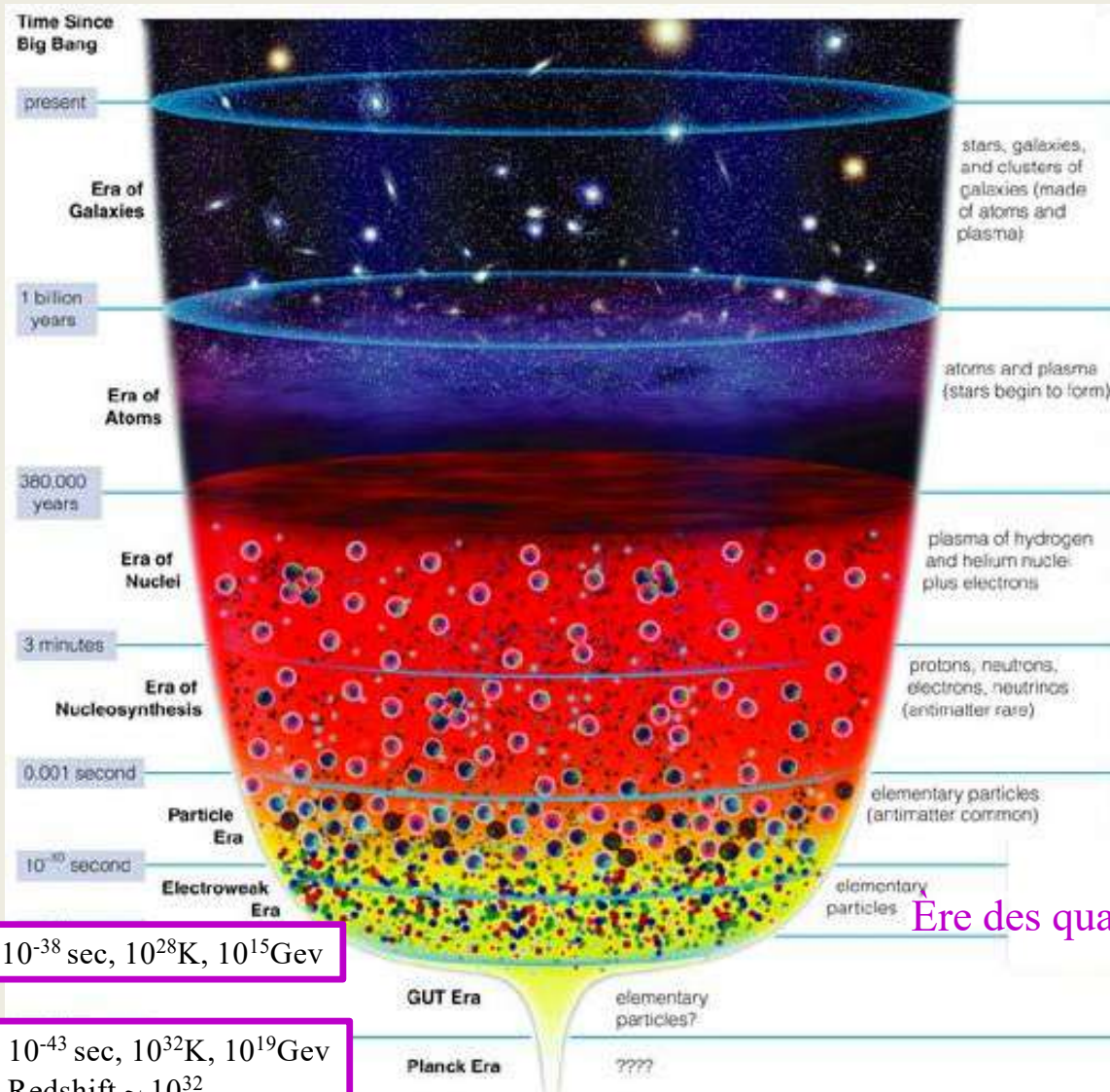
$10^{-43}$  sec,  $10^{32}$ K,  $10^{19}$ Gev  
Redshift  $\sim 10^{32}$

Inflation cosmique

Phase hypothétique d'**expansion accélérée** de l'univers primordial (Adam Guth 1980)  
Explique en particulier l'homogénéité de l'univers observable  
? Type de particules concernées (pas de contraintes expérimentales)  
( $10^{-35}$  à  $10^{-32}$  sec; redshift  $10^{27}$  à  $10^{15}$ )

Chaleur  
Energie quantique, énergie du vide

# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



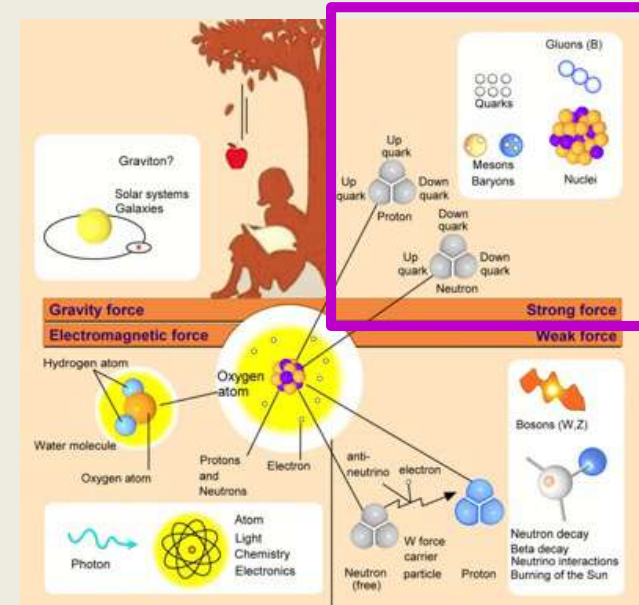
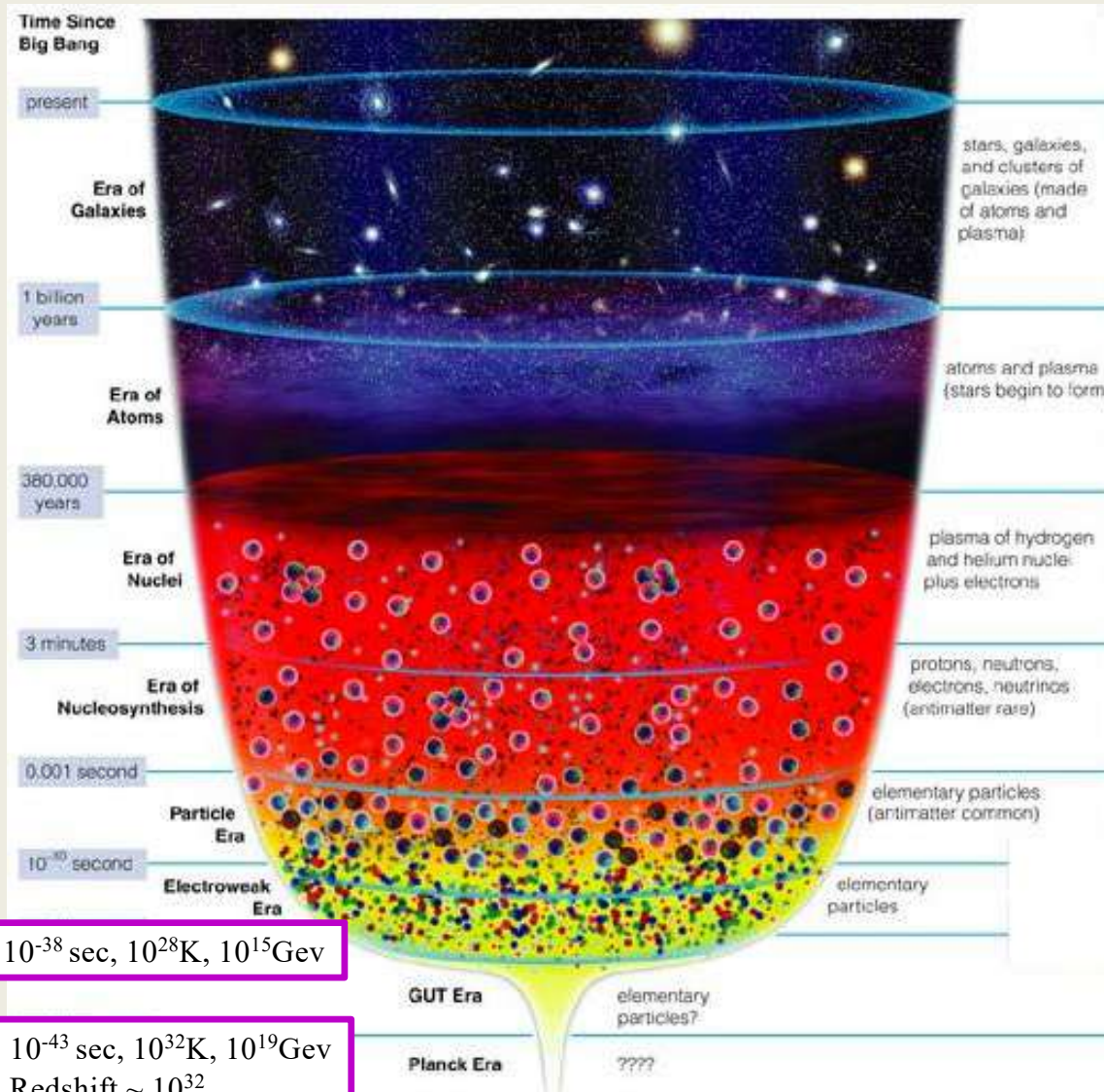
- Densité très élevée, quarks extrêmement comprimés.  
Univers composé de **particules élémentaires en équilibre thermique** (i.e., taux d'interaction entre elles élevé) : « Soupe » de
- quarks libres (pas de nucléons)
  - leptons (électrons, muons, neutrinos, et leurs anti-particules)
  - photons
  - autres particules jamais identifiées (car instables aux énergies plus faibles des époques suivantes) ?
- Encore inaccessible expérimentalement

Ere des quarks (10<sup>-35</sup> à 10<sup>-9</sup> sec)

10<sup>-38</sup> sec, 10<sup>28</sup>K, 10<sup>15</sup>Gev

10<sup>-43</sup> sec, 10<sup>32</sup>K, 10<sup>19</sup>Gev  
Redshift ~ 10<sup>32</sup>

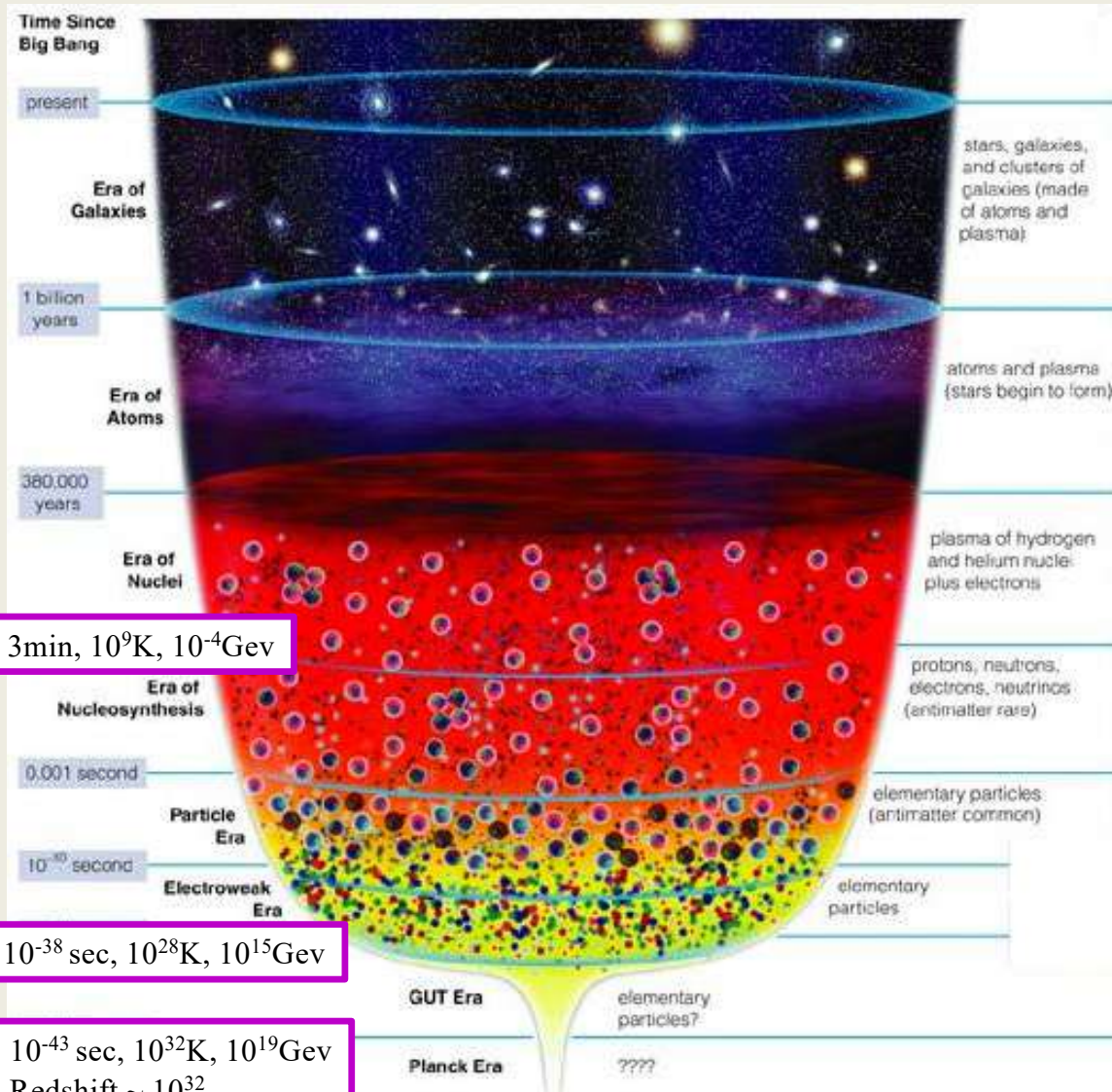
# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



## Ère des hadrons (10<sup>-9</sup> à 1 sec, T ~ 5 x 10<sup>9</sup> K)

Expansion « lente », augmentation de volume, baisse de la densité.  
L'interaction forte « oblige » les quarks à se regrouper pour former des hadrons: protons (noyau d'hydrogène, début de la nucléosynthèse), neutrons, et leurs anti-particules  
+ électrons, positrons, neutrinos, antineutrinos « libres »

# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud



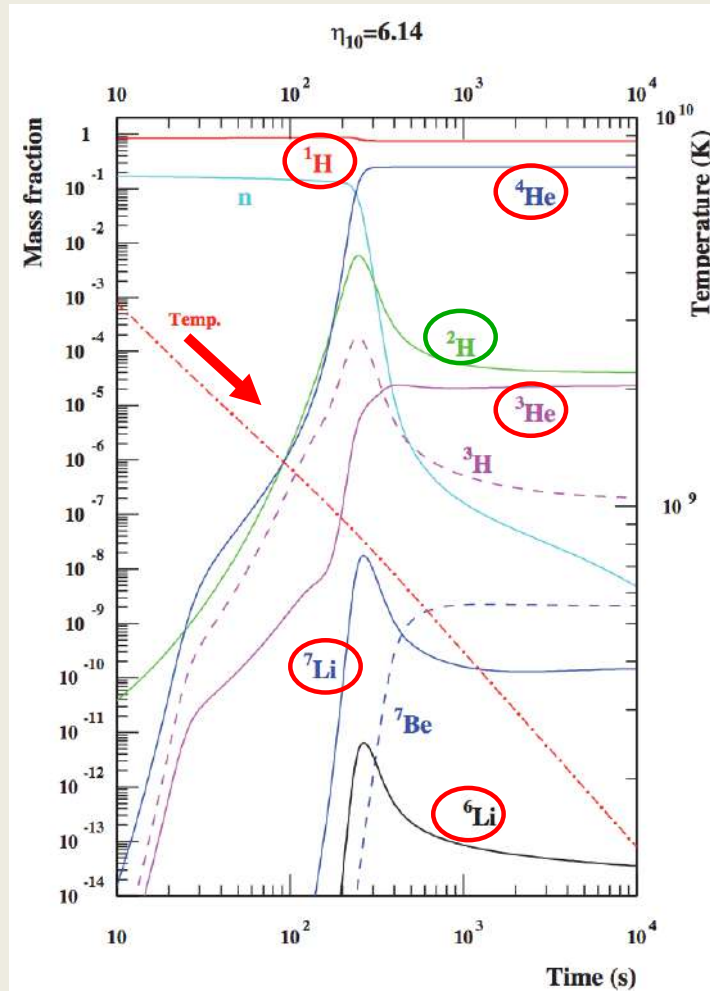
## Nucléosynthèse primordiale (3 à 30 minutes après le Big Bang)

Univers primordial ionisé (neutrons et protons « libres »)

Température comparable à celle des noyaux d'étoiles:  
entre le million et le milliard de Kelvin

Neutrons et protons fusionnent → Éléments légers

# Nucléosynthèse primordiale



Expansion → densité et température ↘

$T > 10^{10}$  K (1 dix-millionième de seconde)

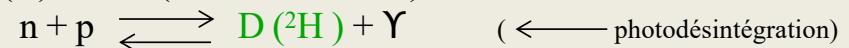
Neutrons, protons, électrons, positrons, neutrinos et anti-neutrinos en équilibre thermodynamique

Les protons se transforment en neutrons par collision avec un antineutrino ou un électron; réactions inverses transforment le neutron en proton par collision avec un positron.

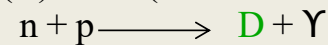
$T \sim 10^{10}$  K (1 seconde): Début de la nucléosynthèse primordiale

Energie plus faible, équilibre rompu → Les **protons** (noyau d'**hydrogène**) ne se changent plus en neutrons, alors que les **neutrons** (instables hors du noyau atomique) continuent à se transformer en protons →  $n_p/n_n = 7$

$10^9 < T$  (K)  $< 10^{10}$  (~ minutes 3 à 15) :



$10^9 < T$  (K)  $< 10^8$  (~ minutes 15 à 30) :



$n/p \sim 0.1$  (décroissance beta)

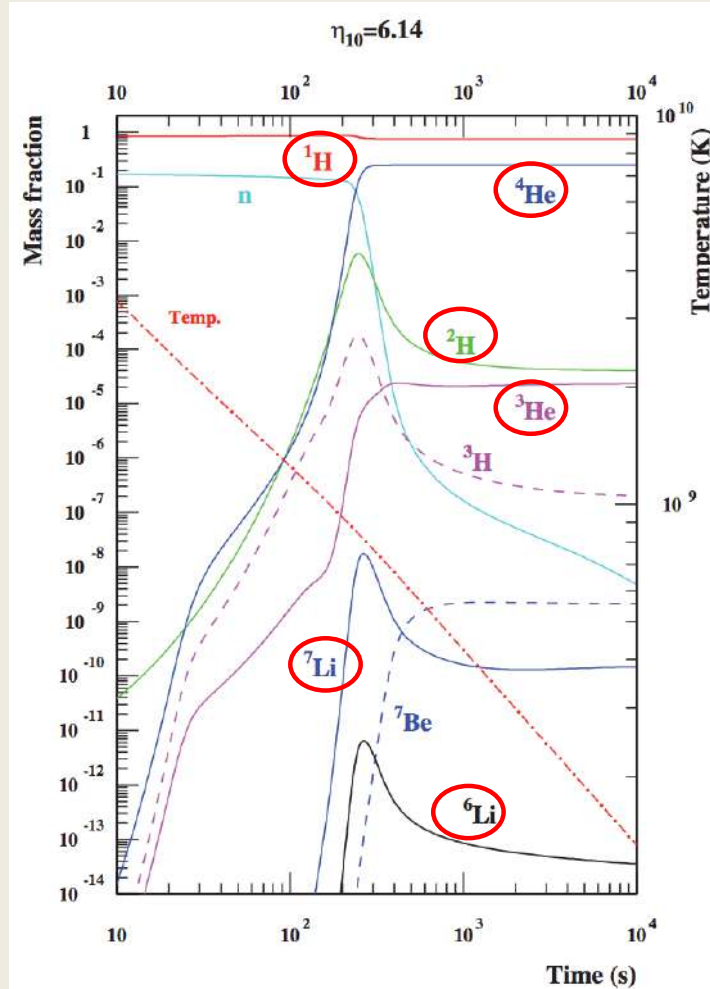
Formation de  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^4\text{He}$  (~ tous les neutrons finissent dans les noyaux d'hélium)

$T$  (K)  $> 10^8$  (> 30 minutes) :

Température et densité trop faibles pour la fusion, la nucléosynthèse s'arrête

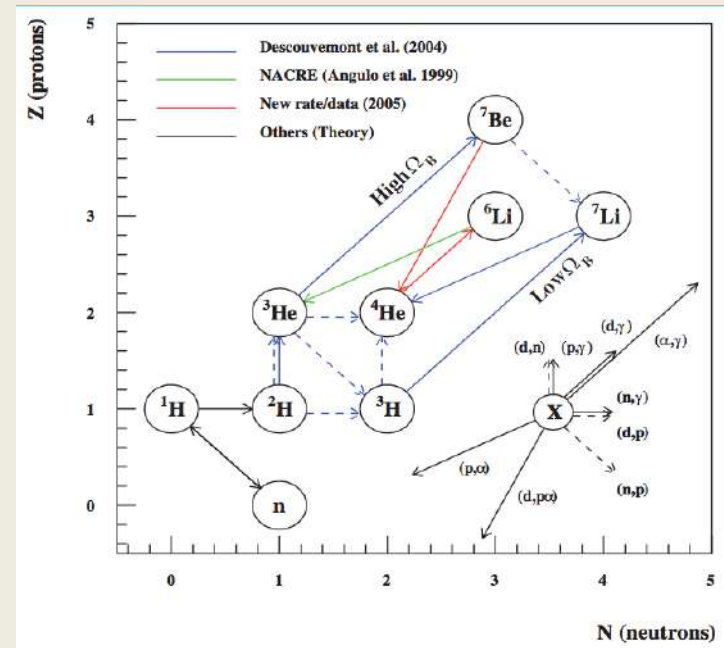


# Nucléosynthèse primordiale



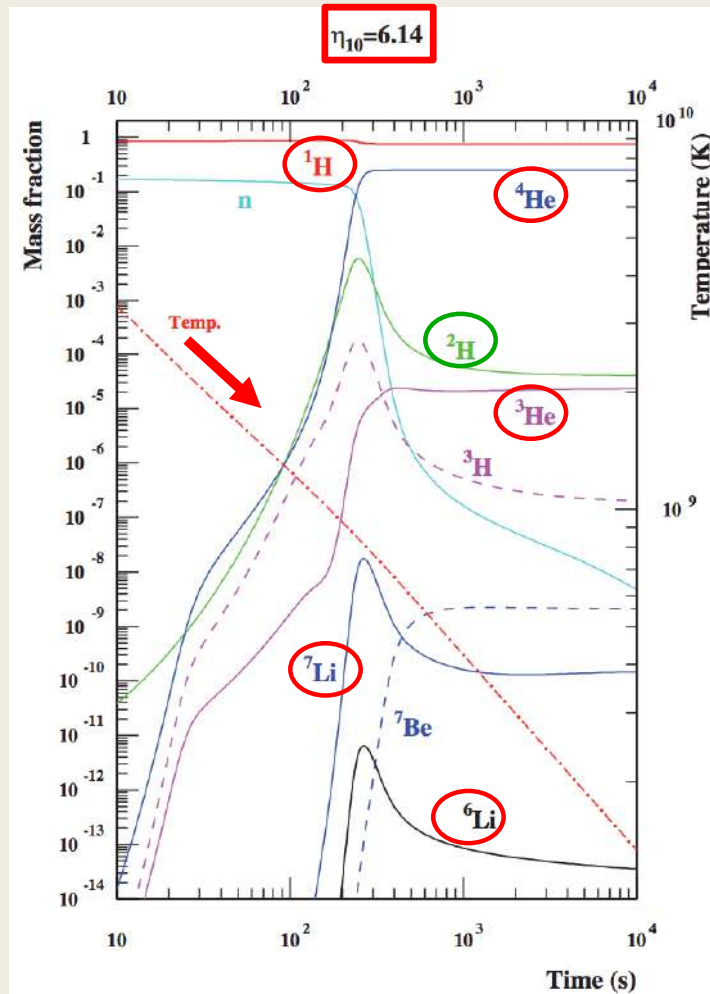
Production des éléments légers H, D,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  dans les premières minutes après le Big Bang

Gamov et al. (1940), Peebles (1966), Wagoner et al. (1967)



Réactions nucléaires mesurées au laboratoire aux énergies (températures) concernées

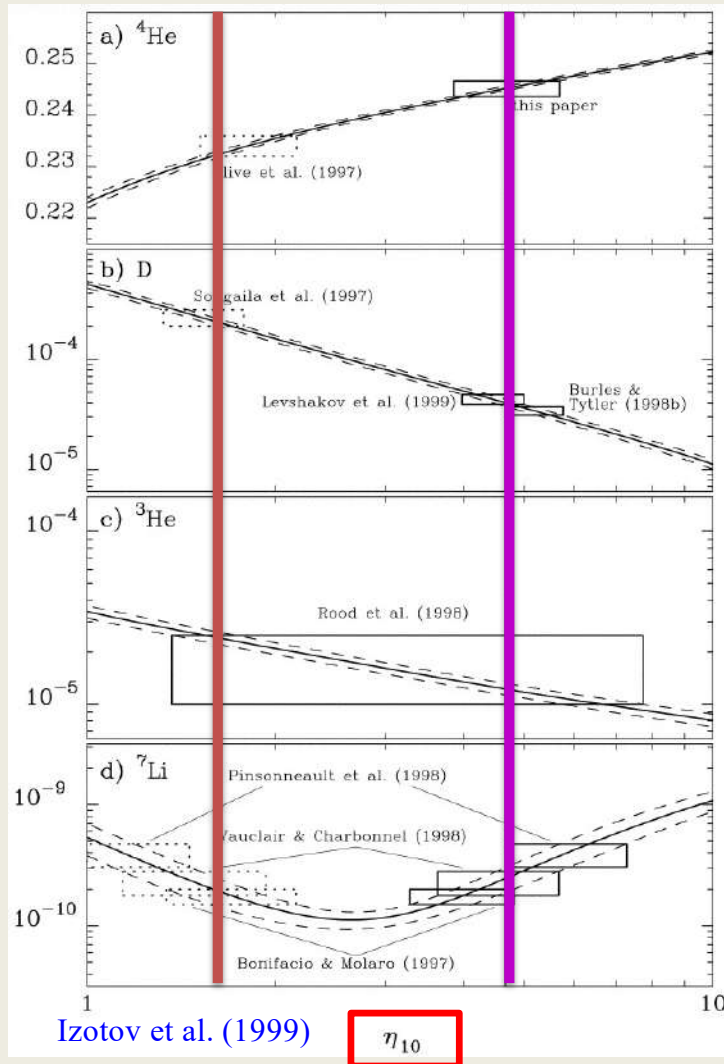
## Nucléosynthèse primordiale



$\eta$  = densité baryonique de l'Univers  
= nombre de baryons / nombre de photons  
 $\eta_{10} = \eta \times 10^{10}$

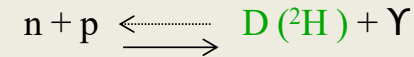
Ce seul nombre baryonique permet de déterminer les abondances primordiales des différents éléments légers créés lors de cette nucléosynthèse.

# Nucléosynthèse primordiale



$\eta$  = densité baryonique de l'Univers  
 = nombre de baryons / nombre de photons  
 $\eta_{10} = \eta \times 10^{10}$

$10^9 < T \text{ (K)} < 10^{10}$  (~ minutes 3 à 15) :



S'il y a beaucoup de photons ( $\eta$  petit), la nucléosynthèse du deutérium démarre plus tard, à un moment où il y a moins de neutrons (instables en dehors des noyaux atomiques).

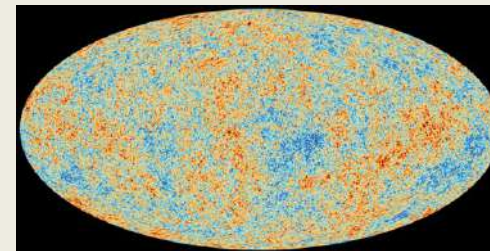
Or ~ tous les neutrons se retrouvent dans les noyaux d'hélium

→ Quantité d'hélium produit plus faible

S'il y a beaucoup de baryons ( $\eta$  grand), la nucléosynthèse du deutérium démarre plus tôt,

→ Quantité d'hélium produit plus grand

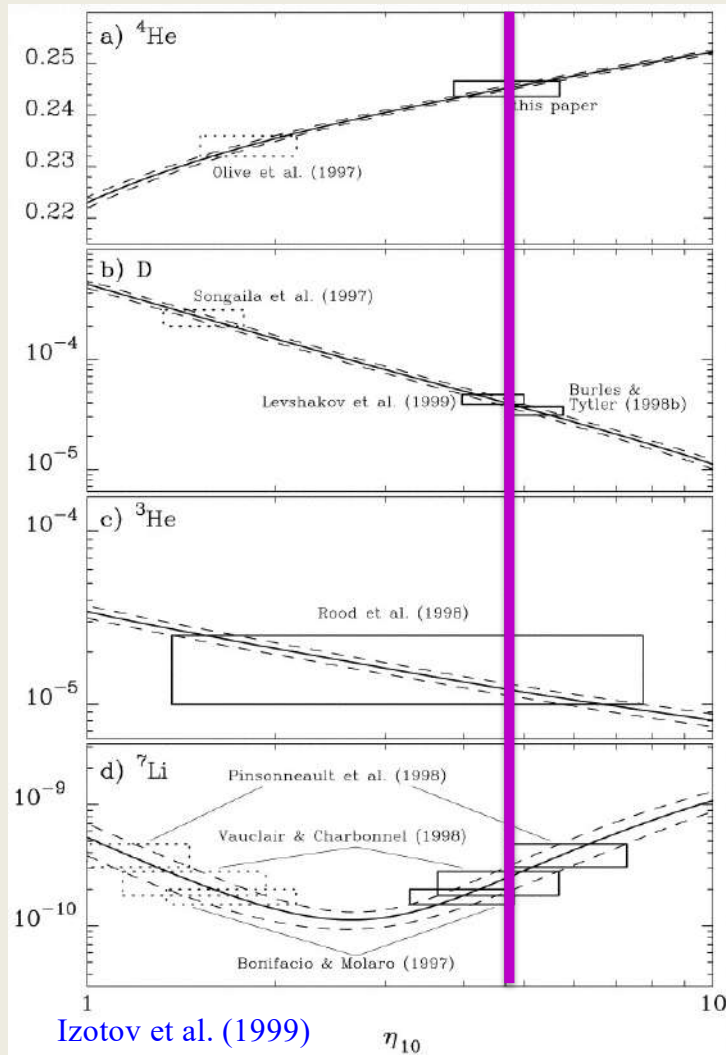
✓ Première contrainte observationnelle sur la densité baryonique de l'univers



Anisotropies du CMB  
 Planck collaboration (2020)

# Nucléosynthèse primordiale

## Observations dans des sites «primitifs»



$\eta$  = densité baryonique de l'Univers  
= nombre de baryons / nombre de photons  
 $\eta_{10} = \eta \times 10^{10}$

# Nucléosynthèse primordiale

## Observations dans des sites «primitifs»

### Lithium 7

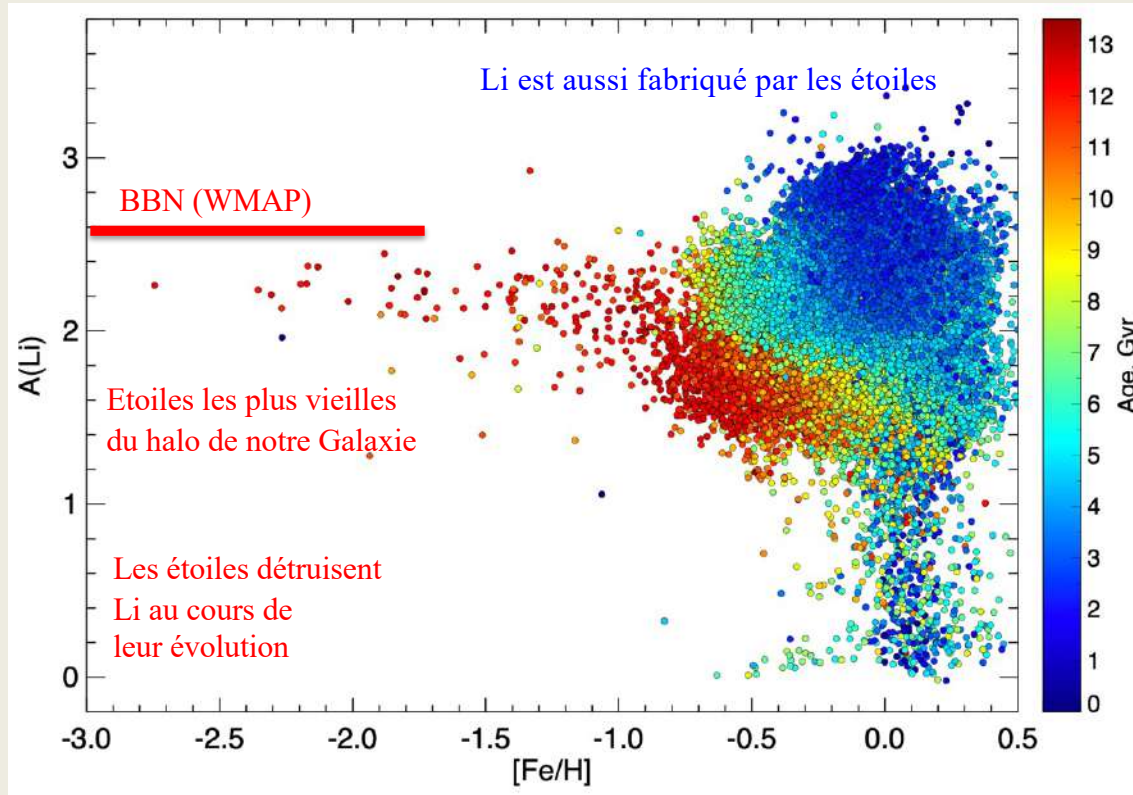
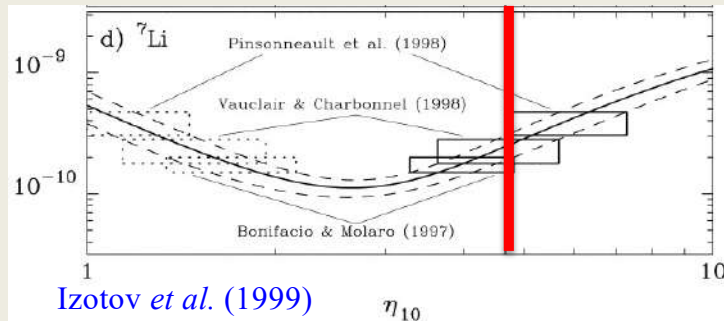
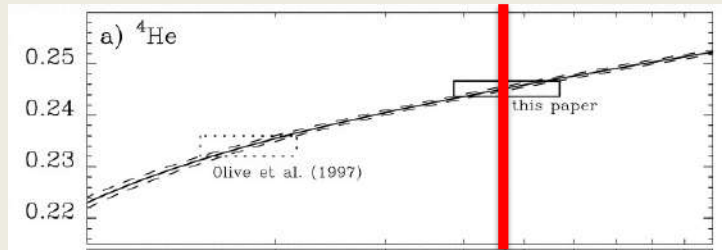


Figure S.Borisov  
Données GALAH



Nucléosynthèse primordiale  
Observations dans des sites «primitifs»  
Hélium 4

$^4\text{He}$  : Régions HII (nuages de gaz où H est ionisé)  
de galaxies bleues compactes (très peu évoluées)



Aussi fabriqué par les étoiles



Sylvia Torres-Peimbert  
Manuel Peimbert

Izotov et al. (1999)

I Zwicky 18  
Crédit HST/NASA/ESA

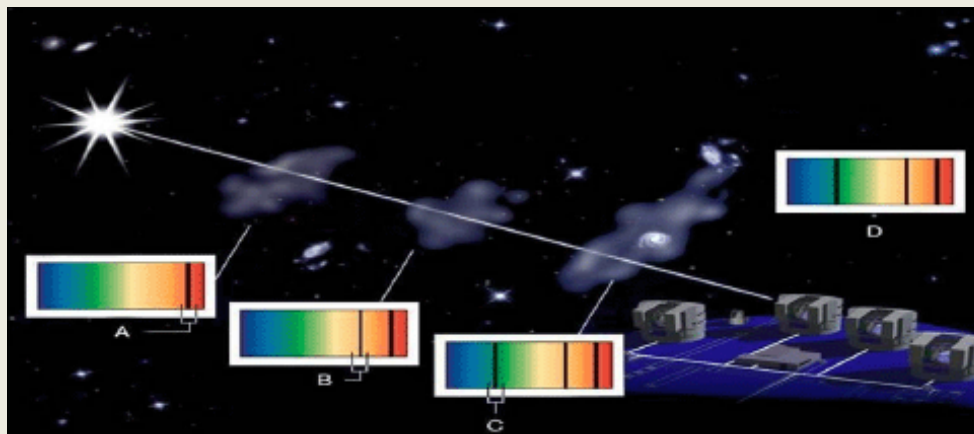
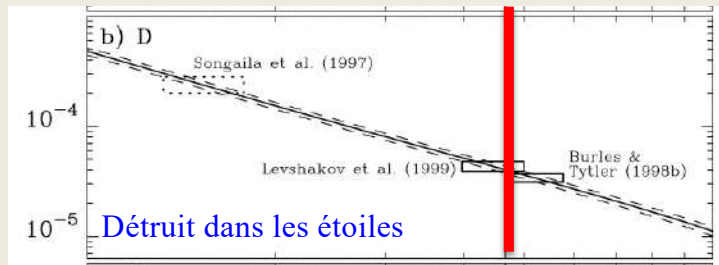


# Nucléosynthèse primordiale

## Observations dans des sites «primitifs»

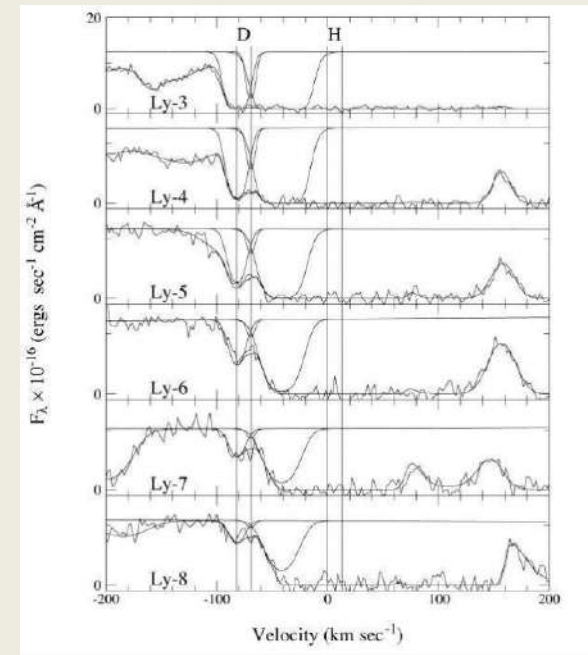
### Deutérium

D : Nuages de gaz à des distances cosmologiques sur la ligne de visée de quasars lointains



Izotov et al. (1999)

Cloud at redshift of  $z = 3.6$  on the line of sight of quasar QSO 1937-1009



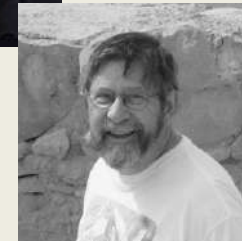
# Nucléosynthèse primordiale

## Observations dans des sites «primitifs»

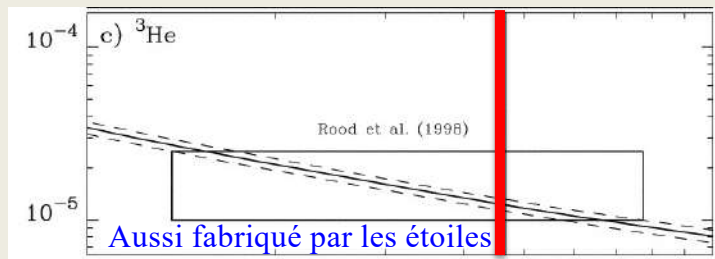
### Hélium 3



T. Bania  
R. T. Rood



Détruit dans les étoiles



$^3\text{He}$  : Pas de site primitif facilement observable  
seulement dans des nébuleuses proches,  
nébuleuses planétaires et régions HII

Produit dans les étoiles de faible masse comme  
le Soleil

Détruit dans les étoiles massives

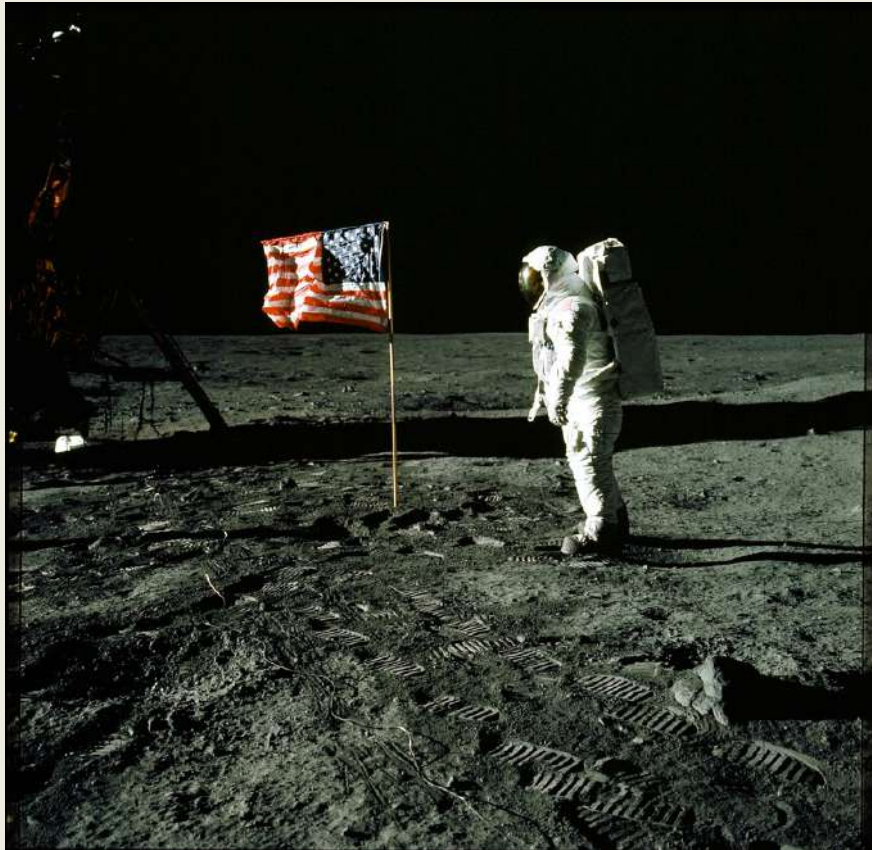
→ Reconstruire son évolution au cours du temps

Izotov et al. (1999)

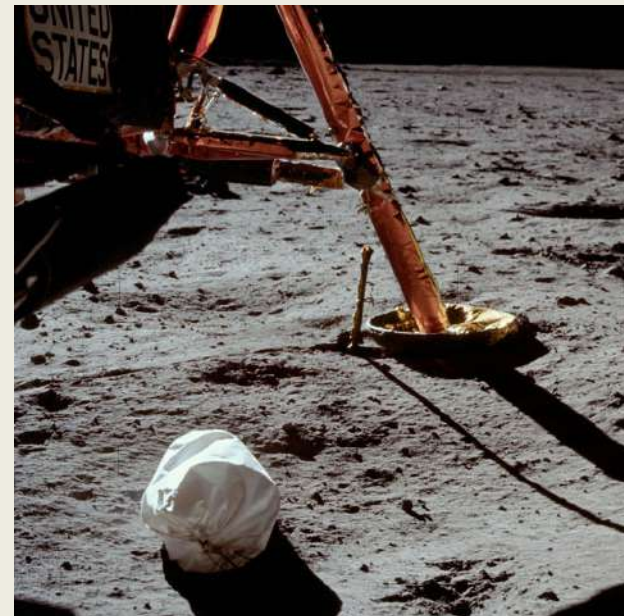
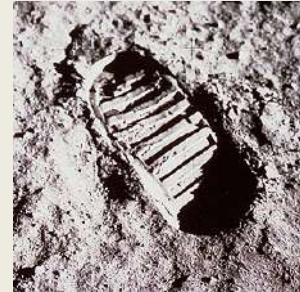


Neil A. Armstrong, commander  
Michael Collins, command module Columbia pilot  
Edwin E. Aldrin, Jr., lunar module Eagle pilot

# Apollo 11



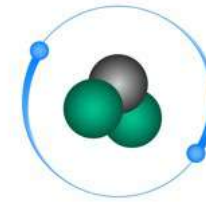
Apollo 11 Lunar Module pilot Edwin Aldrin at 03:15 UT on 21 July 1969 (20 July 1969, 11:15 EDT) and became the second person to walk on the Moon. (Apollo 11, AS11-40-5868)



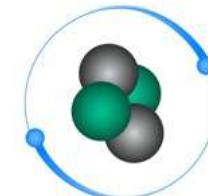
Jettison Bag (Armstrong – NASA)

1969 – 1972 (Apollo 11, 12, 14, 15, 16)

## Solar wind experiment on the Moon



Helium-3  
2 protons, 1 neutron



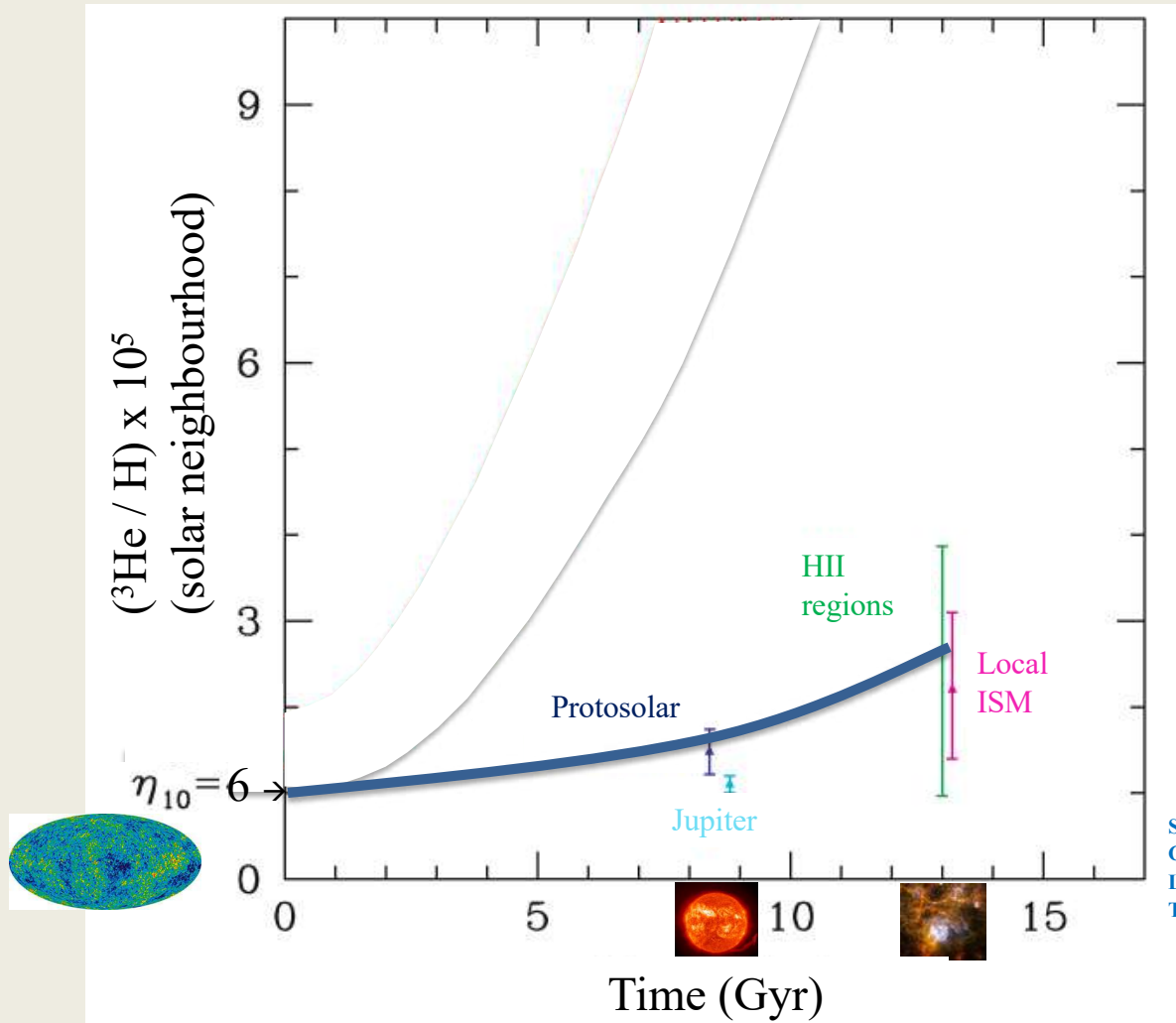
Helium-4  
2 protons, 2 neutrons

Figure 1. Apollo 11 Astronaut Edwin E. Aldrin deploying the SWC experiment in Mare Tranquillitatis on July 21, 1969. Photograph by Commander Neil A. Armstrong (NASA Photo S11-40-5872).

Geiss *et al.* (1965, 1969)  
1969 – 1972 (Apollo 11, 12, 14, 15, 16)

# Nucléosynthèse primordiale

## Evolution de l'Hélium 3 dans la Galaxie



Solution thermohaline  
 Charbonnel & Zahn (2007a, b)  
 Lagarde, Romano, Charbonnel,  
 Tosi, Chiappini, Matteucci (2012)

## $^3\text{He}$ – L'énergie du futur ? e la Lune

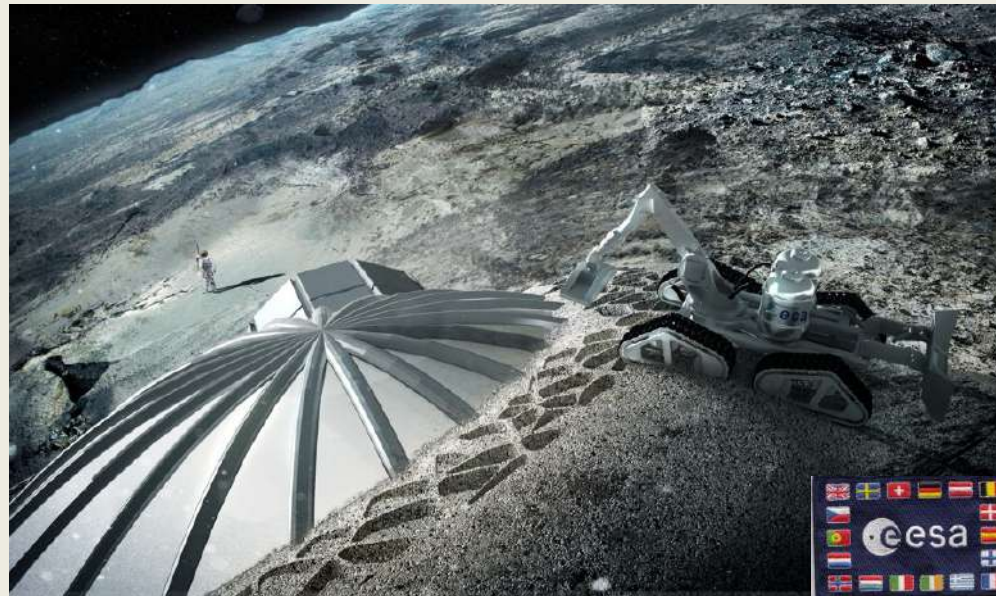


100'000 tonnes d'hélium-3 dans le régolite lunaire  
(Missions Apollo)

~ 15 tonnes sur Terre

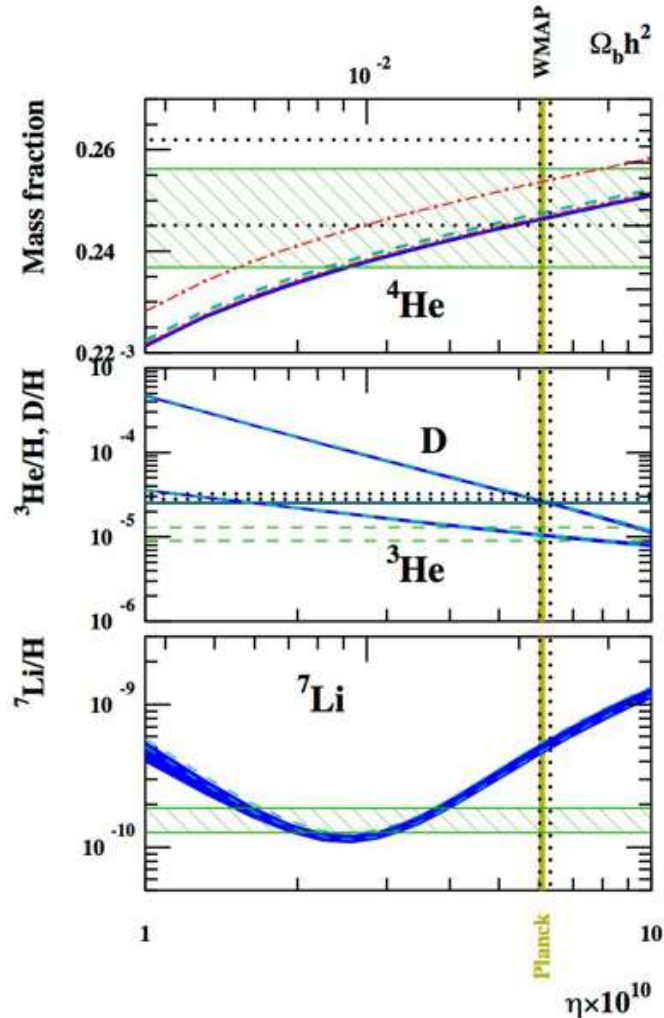
Centrales nucléaires à fusion contrôlée de 2ème génération  
(pas de pollution ni de radioactivité)

25 tonnes de  $^3\text{He}$  → énergie consommée par les USA en 1 an



[http://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Space\\_for\\_Earth/Energy/Helium-3\\_mining\\_on\\_the\\_lunar\\_surface](http://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Space_for_Earth/Energy/Helium-3_mining_on_the_lunar_surface)

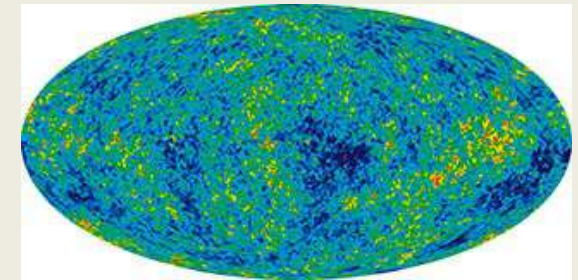
## Nucléosynthèse primordiale Observations dans des sites «primitifs»



Coc *et al.* (2014)

$\eta$  = densité baryonique de l'Univers  
 = nombre de baryons / nombre de photons  
 $\eta_{10} = \eta \times 10^{10}$

✓ Bon accord entre les contraintes observationnelles sur la densité baryonique de l'univers



Anisotropies du CMB  
Planck collaboration (2020)

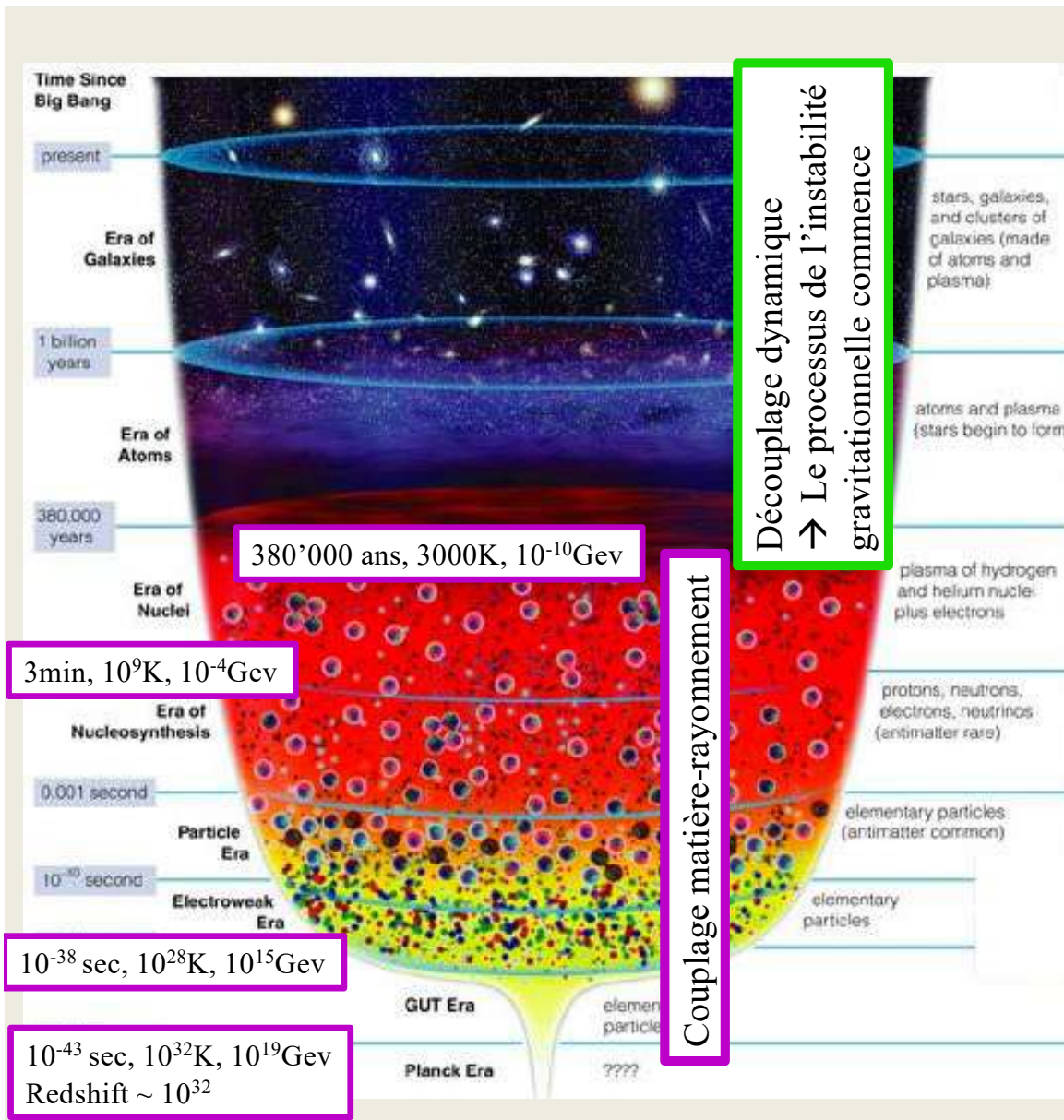
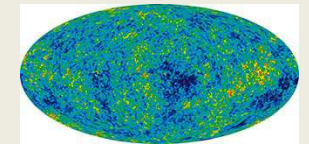
Pour chaque baryon, l'univers contient  $\sim 2 \times 10^9$  photons



# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud

## Ère de la matière (10<sup>6</sup> à 10<sup>10</sup> ans)

Infimes fluctuations de température du fonds diffus cosmologique:  
Empreintes des **fluctuations de densité** existantes à l'époque du découplage



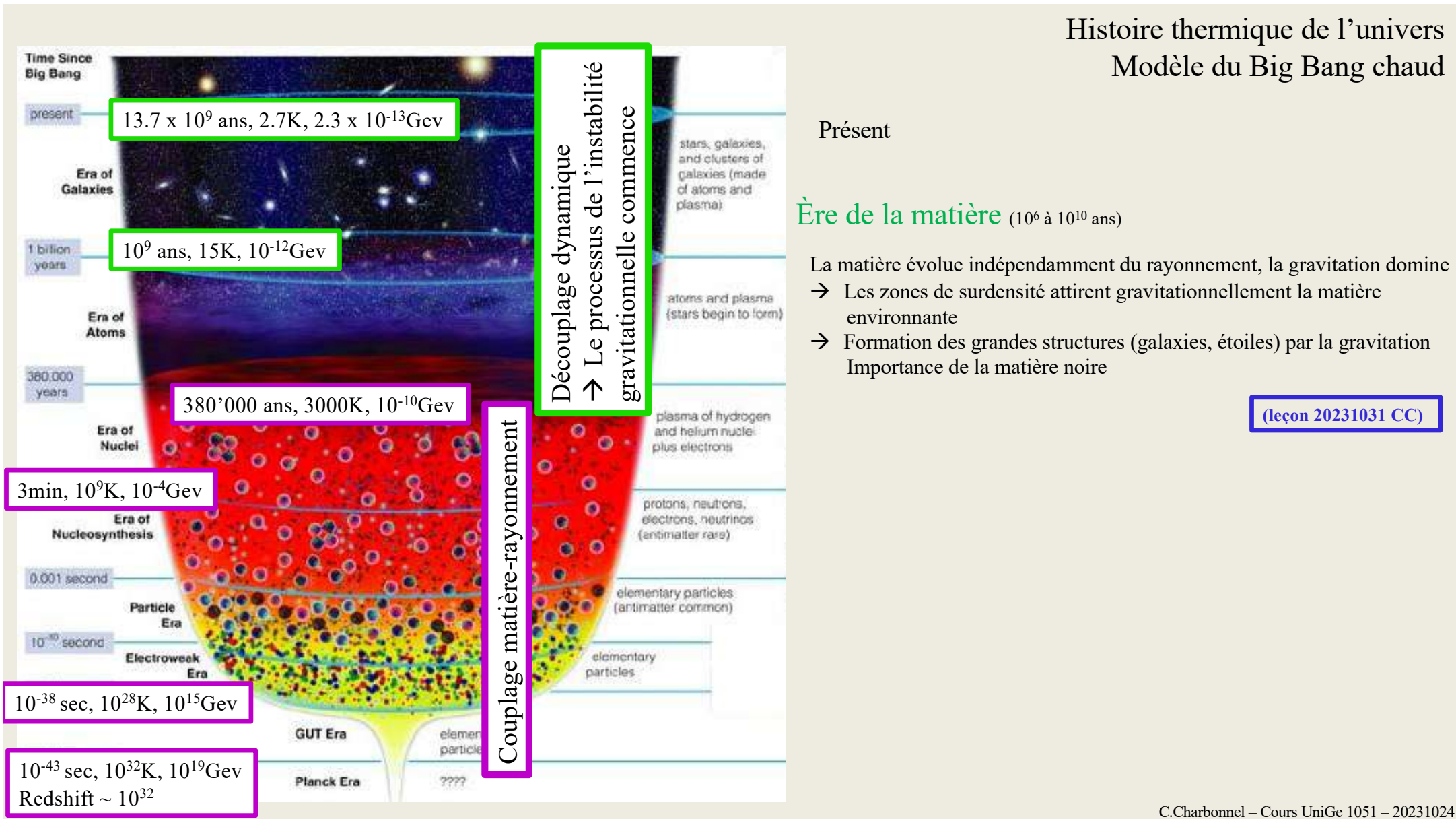
# Histoire thermique de l'univers Modèle du Big Bang chaud

Présent

Ère de la matière (10<sup>6</sup> à 10<sup>10</sup> ans)

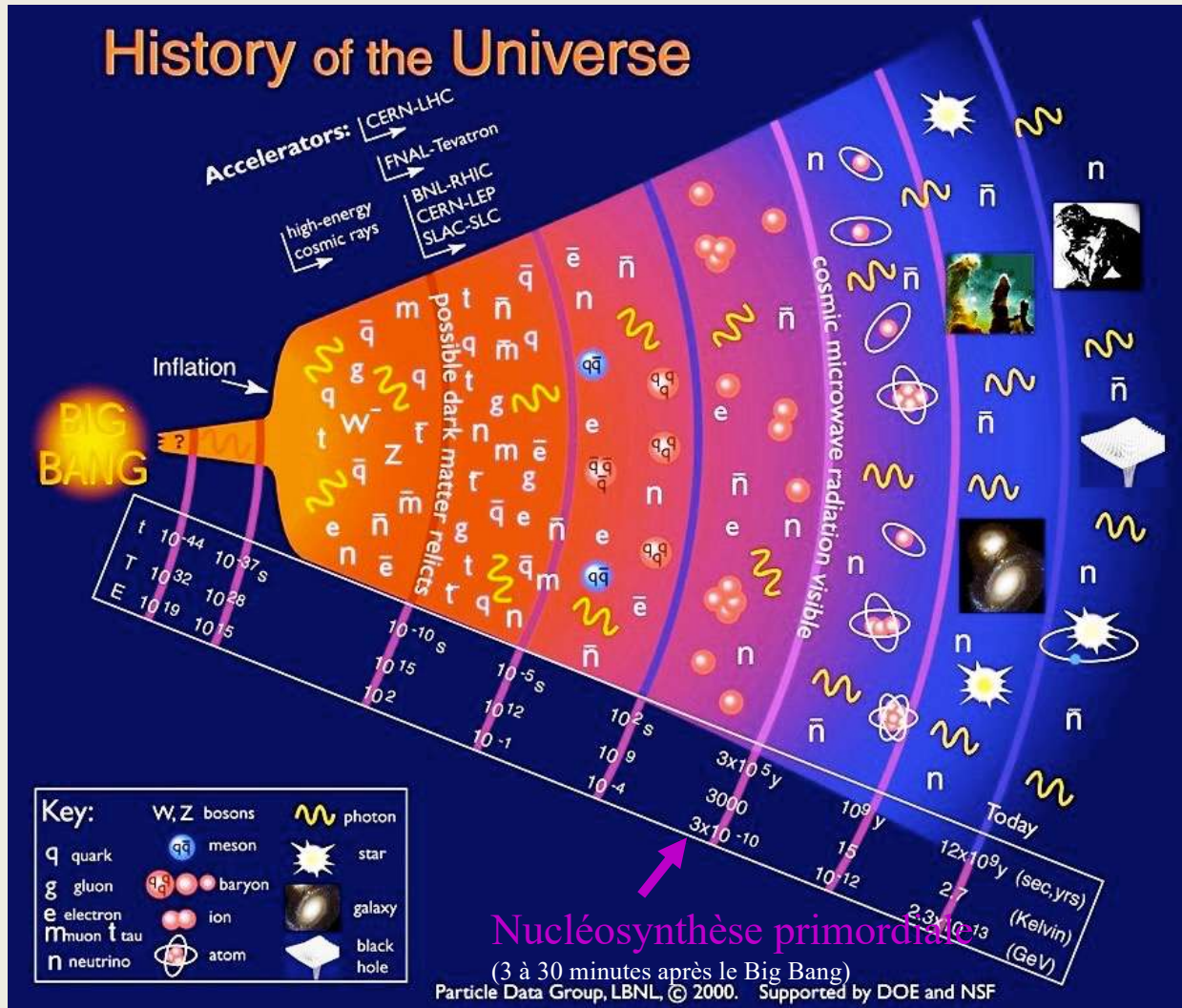
- La matière évolue indépendamment du rayonnement, la gravitation domine
- Les zones de surdensité attirent gravitationnellement la matière environnante
  - Formation des grandes structures (galaxies, étoiles) par la gravitation
- Importance de la matière noire

(leçon 20231031 CC)





# History of the Universe

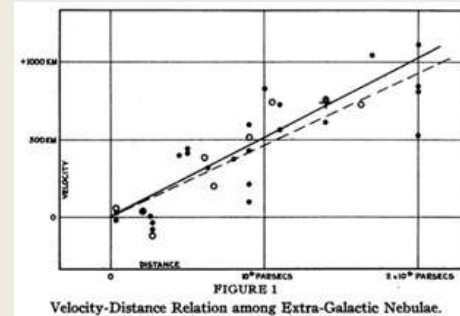


## Les trois piliers observationnels du Big Bang

### (1) Récession des galaxies lointaines (Univers en expansion)

- Les galaxies « s'éloignent » de nous
- Plus elles sont loin, plus elles « s'éloignent » vite
- Distance de la galaxie  $D = v_{\text{expansion}} / H_0$

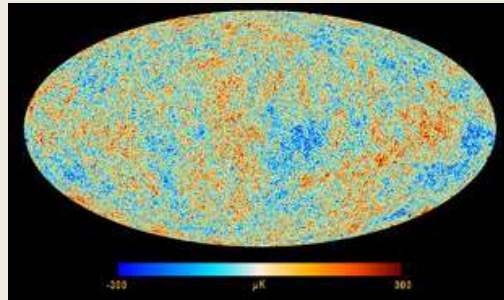
→ Dilatation globale de l'Univers



### (2) Rayonnement du fonds diffus cosmologique (CMB)

- Rayonnement isotrope (micro-ondes/radio/IR lointain) « de corps noir »
- Image de l'univers jeune (300'000 ans)

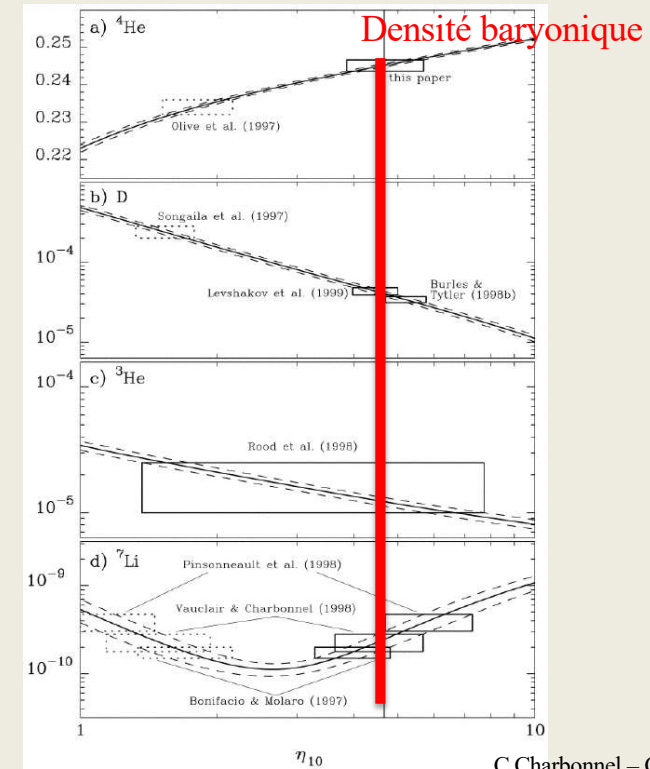
→ Signature d'un état dense, chaud et homogène



### (3) Abondances primordiales des éléments légers

- Hélium, deutérium, lithium présents dans les objets les plus vieux et/ou les plus pristines

→ Fusion thermonucléaire dans une phase primordiale, dense, et chaude



## Le PFH d'après Hubert Reeves

