

# Cosmologie Moderne

## Cours 9



J.-Ch. Hamilton, APC  
hamilton@apc.univ-paris7.fr

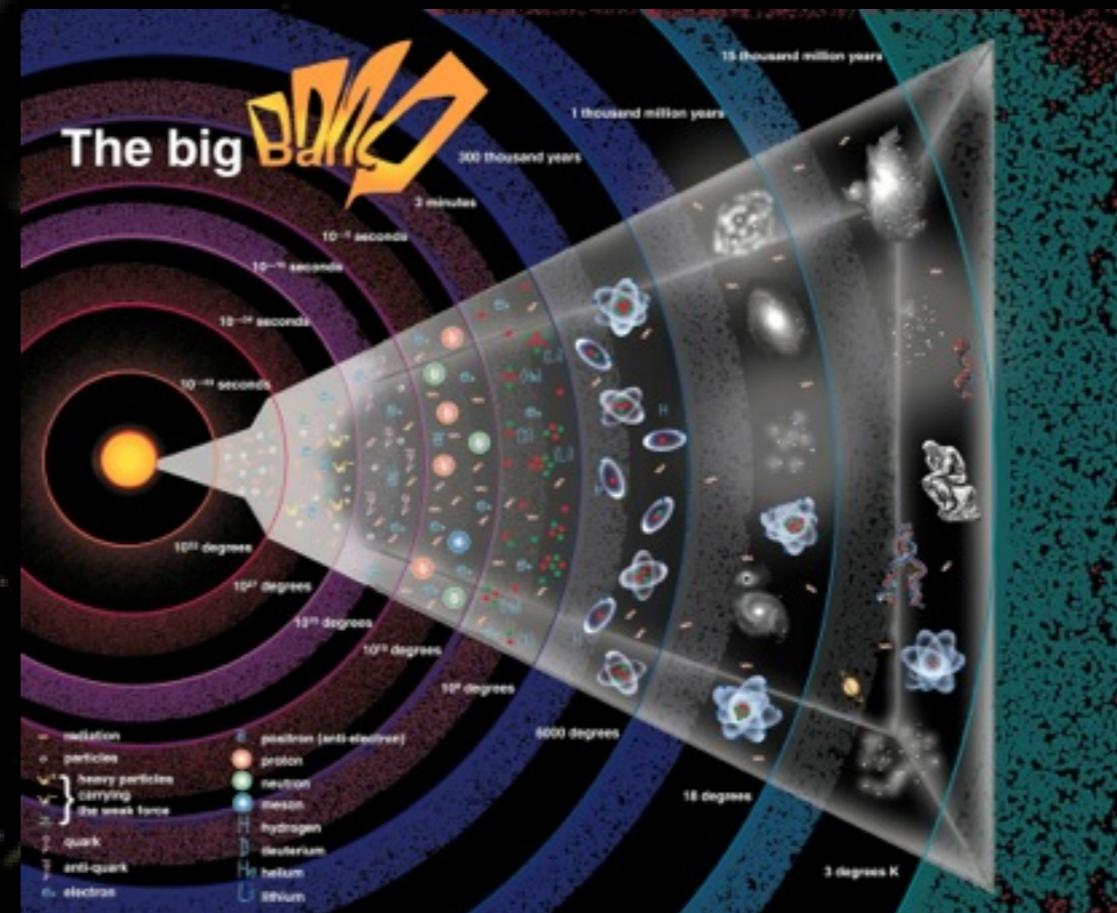
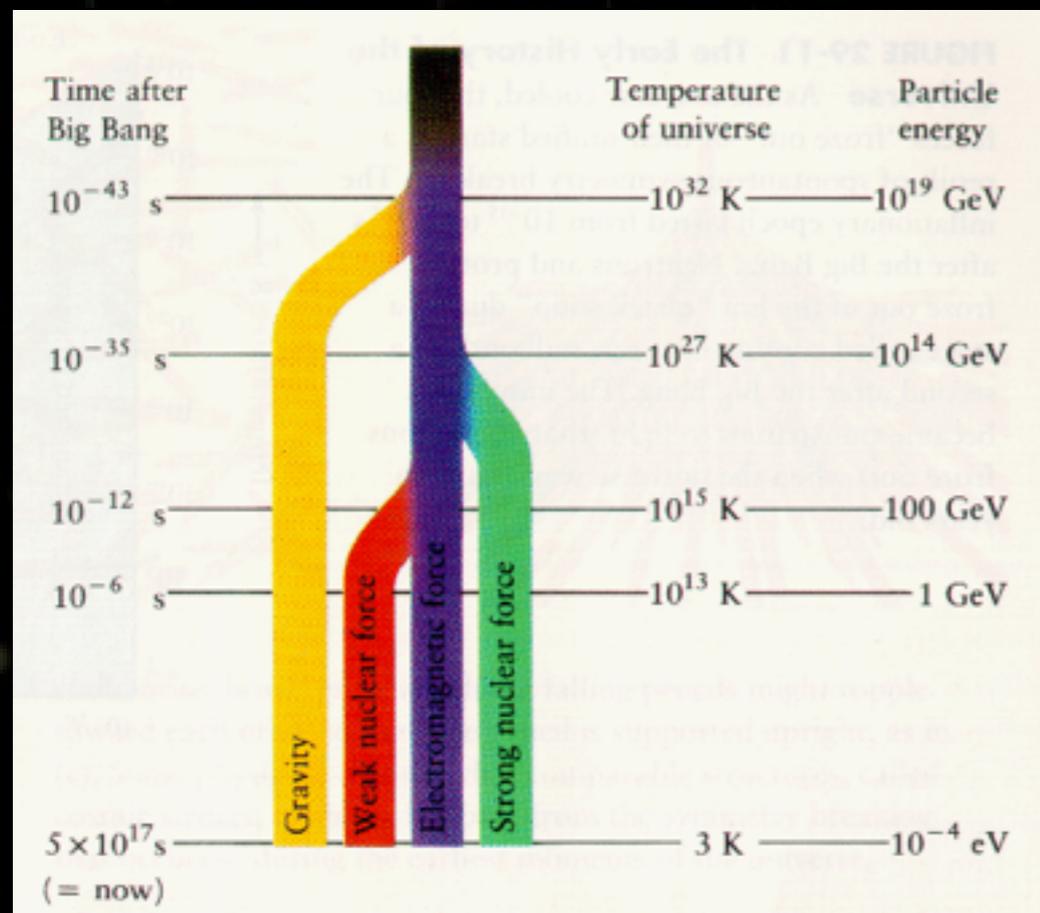
# Vue d'ensemble de la cosmologie

- Les échelles en cosmologie
- Les piliers de la cosmologie
  - ★ Relativité Générale
  - ★ Expansion de l'Univers
  - ★ Principe cosmologique
  - ★ Schéma de principe de la cosmologie observationnelle
- L'Univers de Friedman-Lemaître
  - ★ Métrique de F.L.
  - ★ Redshift
  - ★ Équations de Friedman
  - ★ Histoire de l'expansion
  - ★ Big-Bang
- F.A.Q. de cosmologie
- Histoire thermique de l'Univers



# Histoire thermique de l'Univers

- Le modèle du Big Bang décrit l'Univers comme un milieu dense et chaud au départ
- L'expansion implique un refroidissement
- À certaines températures, des événements spécifiques surviennent (transitions de phases)



temps

# Petite Histoire de l'Univers



temps

# Petite Histoire de l'Univers

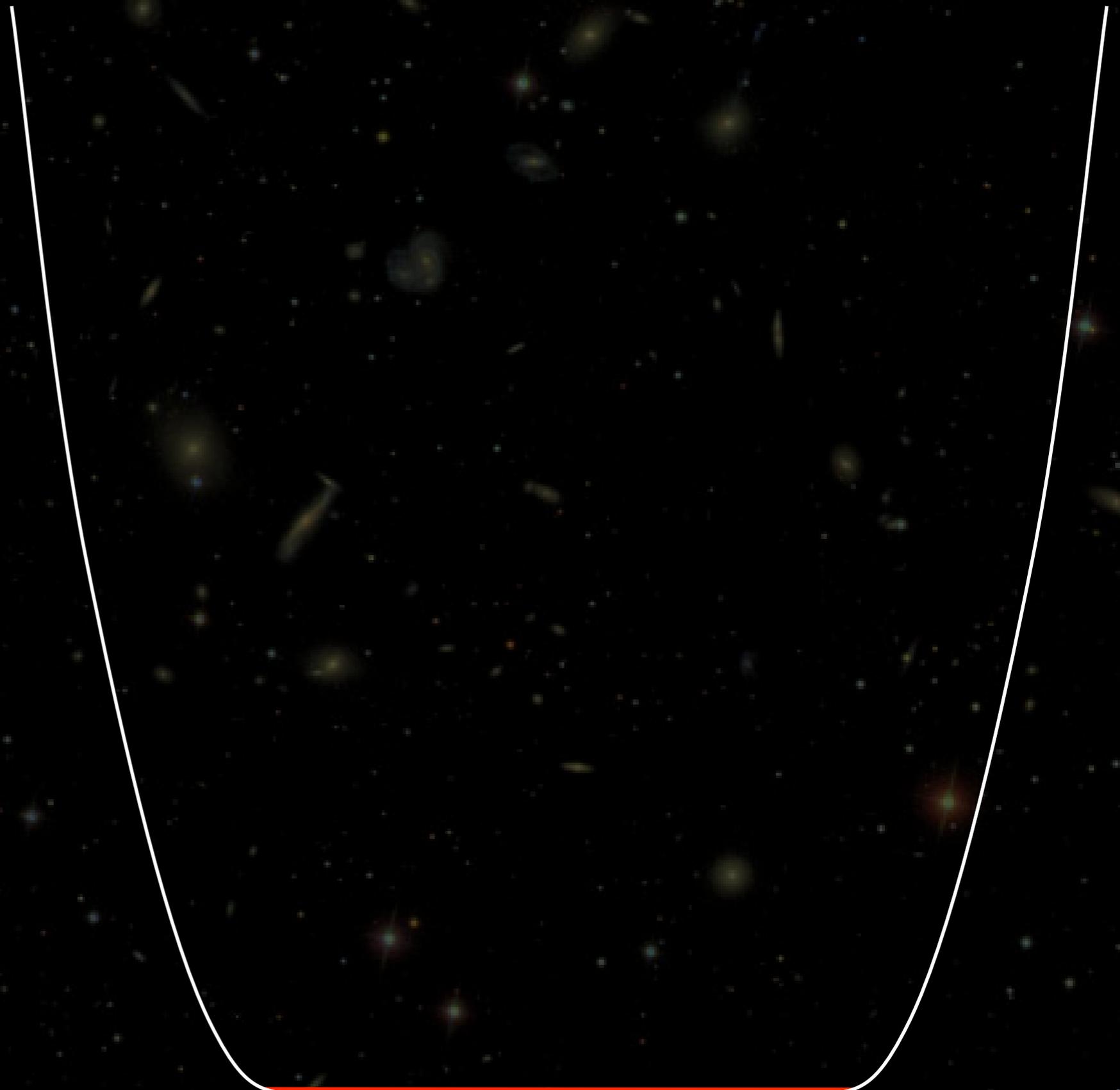


Fig: M. Lemoine



# Petite Histoire de l'Univers

temps



fin inflation —  $10^{-33}$  sec  
début ère  
rayonnement

inflation

Fig: M. Lemoine



# Petite Histoire de l'Univers

temps



confinement quarks —  $10^{-6}$  sec

fin inflation —  $10^{-33}$  sec

début ère rayonnement

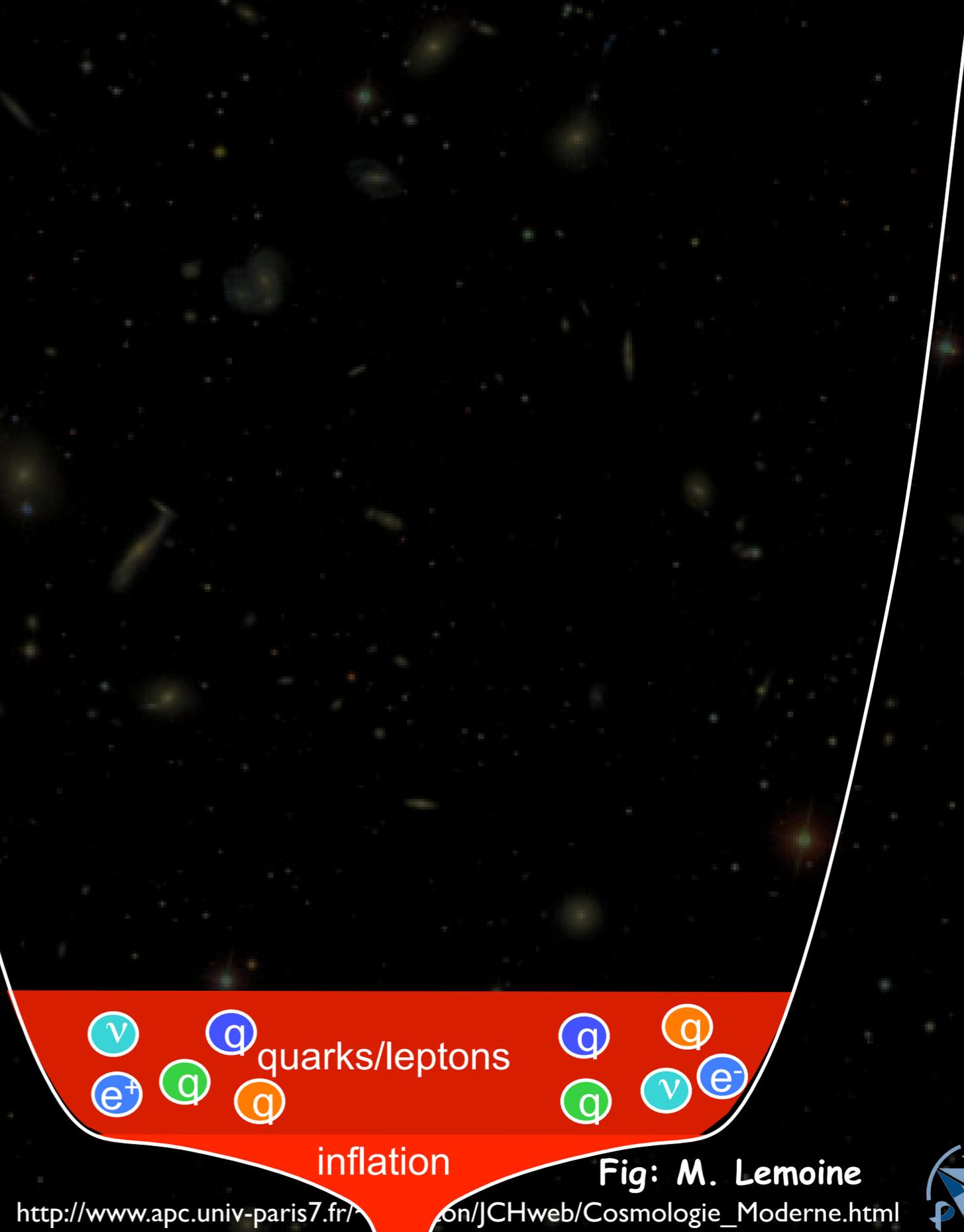


Fig: M. Lemoine

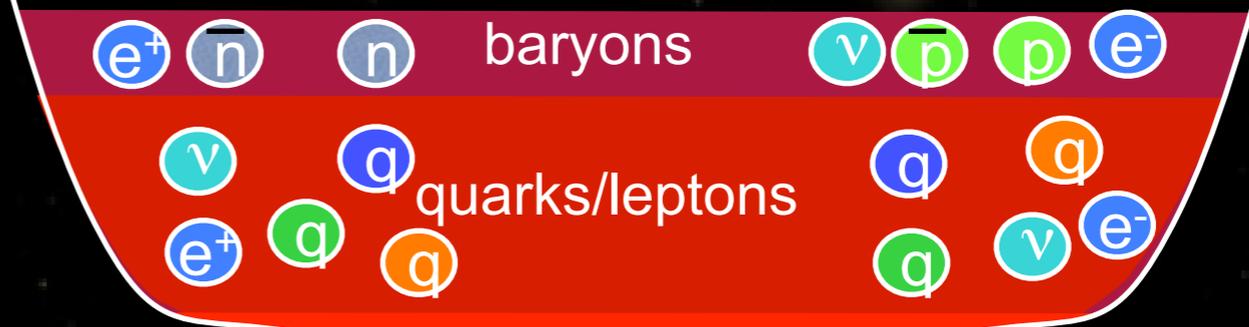


# Petite Histoire de l'Univers

temps



disparition anti-hadrons —  $10^{-4}$  sec  
confinement quarks —  $10^{-6}$  sec  
fin inflation —  $10^{-33}$  sec  
début ère rayonnement



inflation

Fig: M. Lemoine



# Transitions de phase

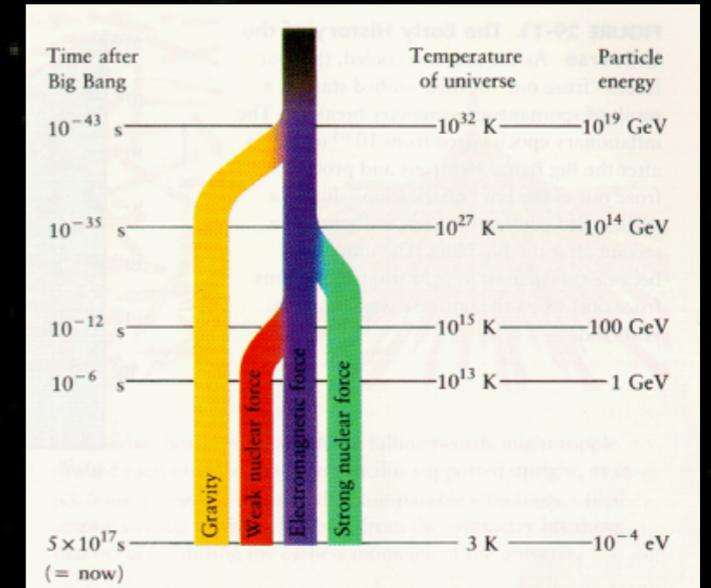
- Séparation entre interactions

- ★ Brisure de symétrie
- ★ Des défauts topologiques peuvent / doivent apparaître

- Défauts topologiques

- ★ Exemple simple : Murs de domaine
- ★ Avec des potentiels plus complexes:
  - Cordes cosmiques
  - Monopoles
  - Textures

- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



# Transitions de phase

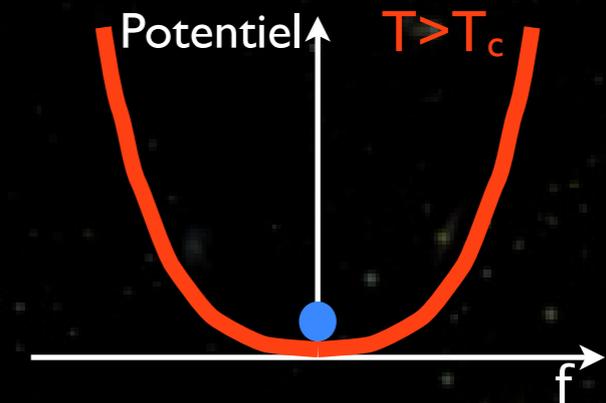
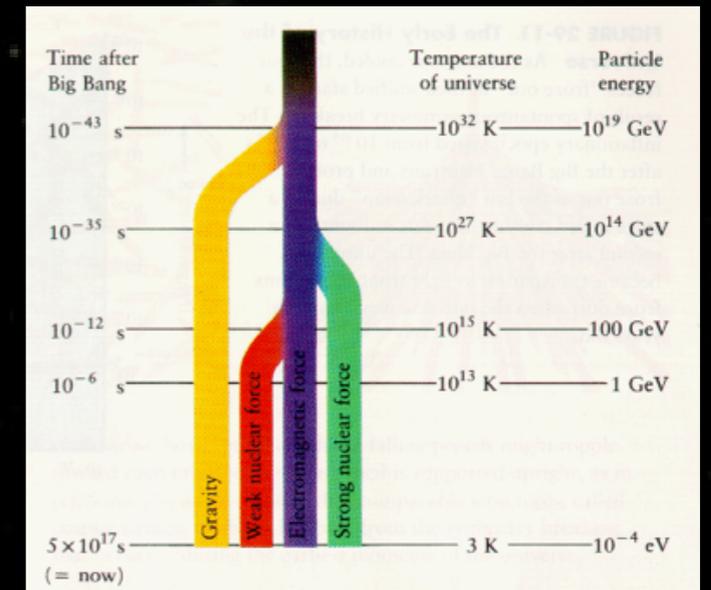
- Séparation entre interactions

- ★ Brisure de symétrie
- ★ Des défauts topologiques peuvent / doivent apparaître

- Défauts topologiques

- ★ Exemple simple : Murs de domaine
- ★ Avec des potentiels plus complexes:
  - Cordes cosmiques
  - Monopoles
  - Textures

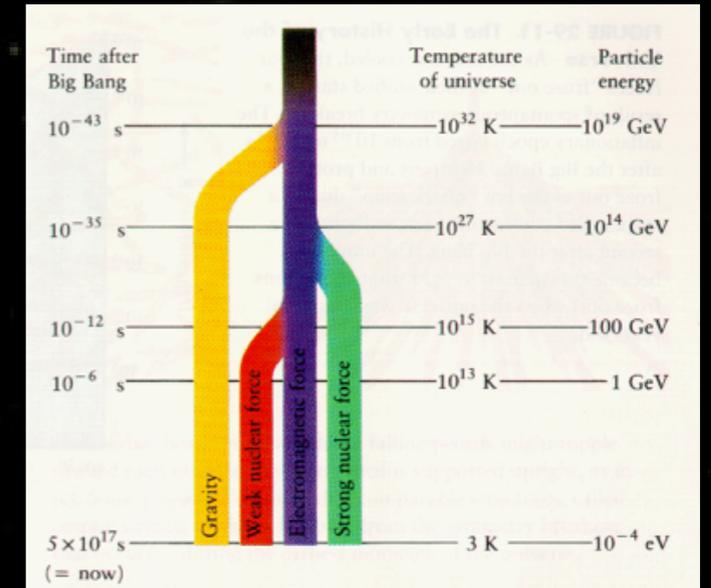
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



# Transitions de phase

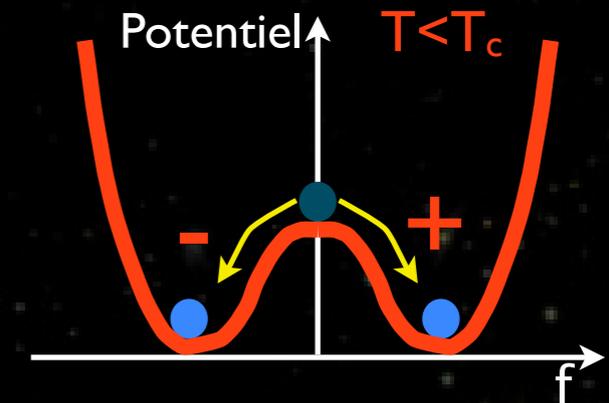
- Séparation entre interactions

- ★ Brisure de symétrie
- ★ Des défauts topologiques peuvent / doivent apparaître



- Défauts topologiques

- ★ Exemple simple : Murs de domaine
- ★ Avec des potentiels plus complexes:
  - Cordes cosmiques
  - Monopoles
  - Textures



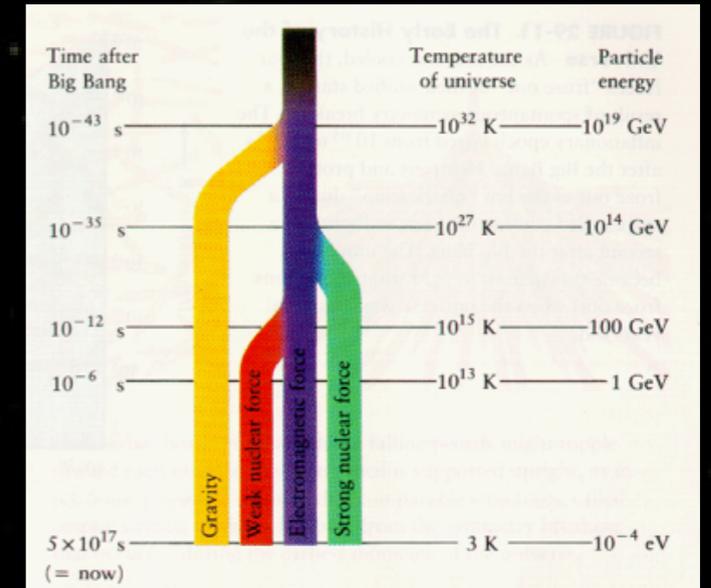
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



# Transitions de phase

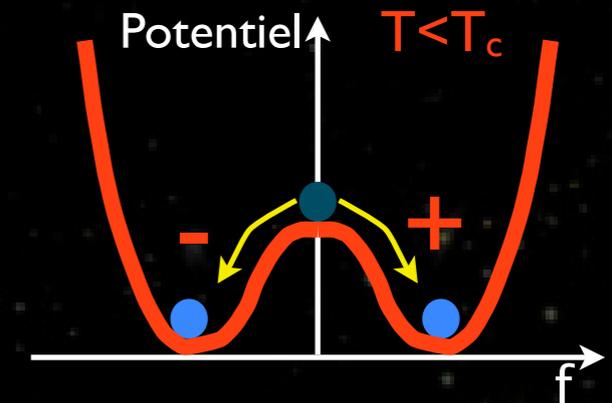
- Séparation entre interactions

- ★ Brisure de symétrie
- ★ Des défauts topologiques peuvent / doivent apparaître

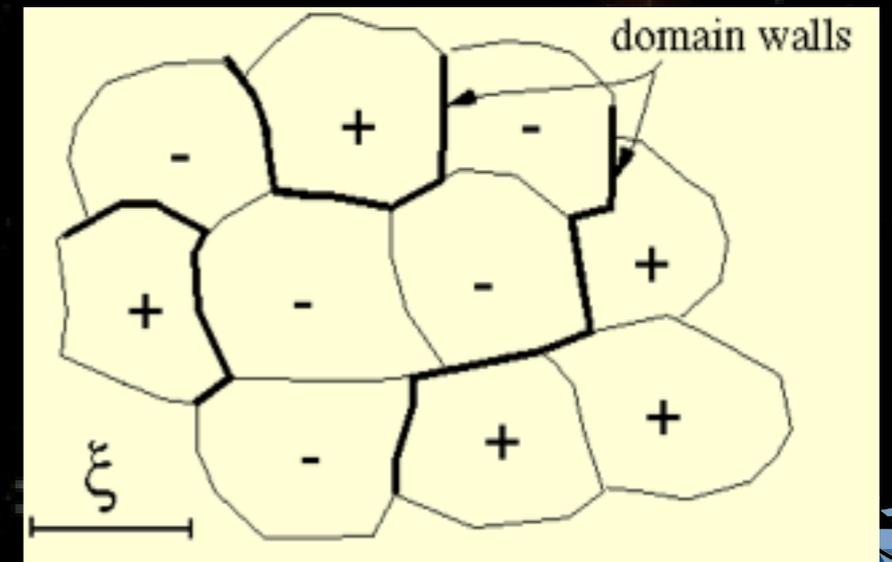


- Défauts topologiques

- ★ Exemple simple : Murs de domaine
- ★ Avec des potentiels plus complexes:
  - Cordes cosmiques
  - Monopoles
  - Textures



- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



# Transitions de phase

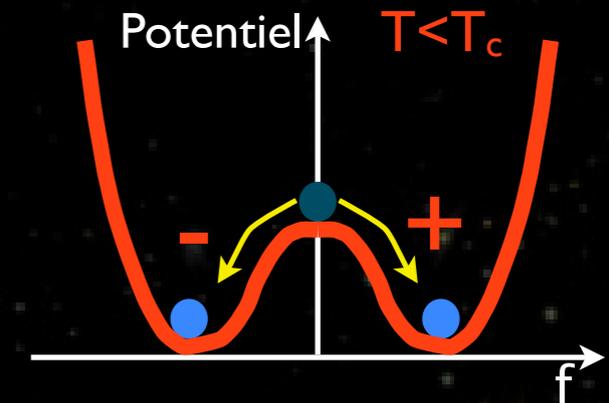
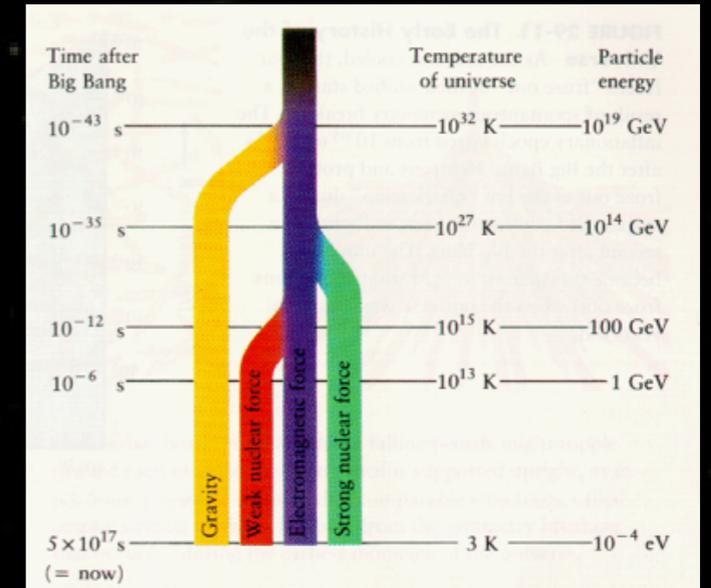
- Séparation entre interactions

- ★ Brisure de symétrie
- ★ Des défauts topologiques peuvent / doivent apparaître

- Défauts topologiques

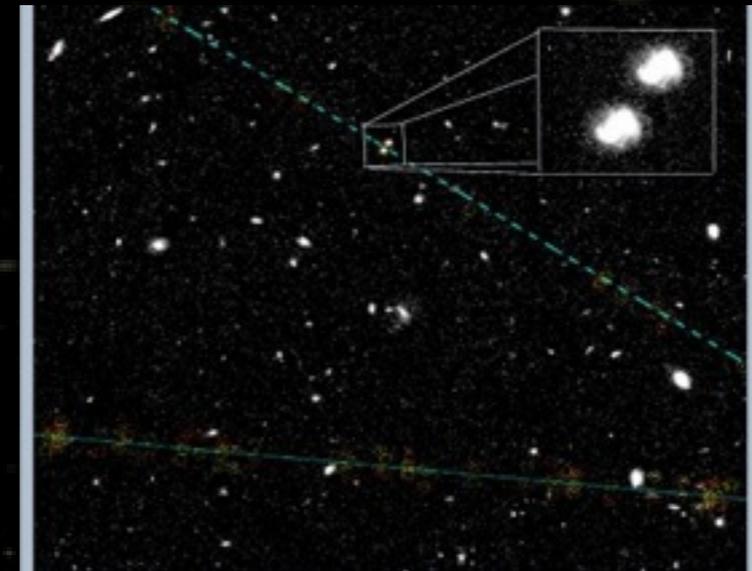
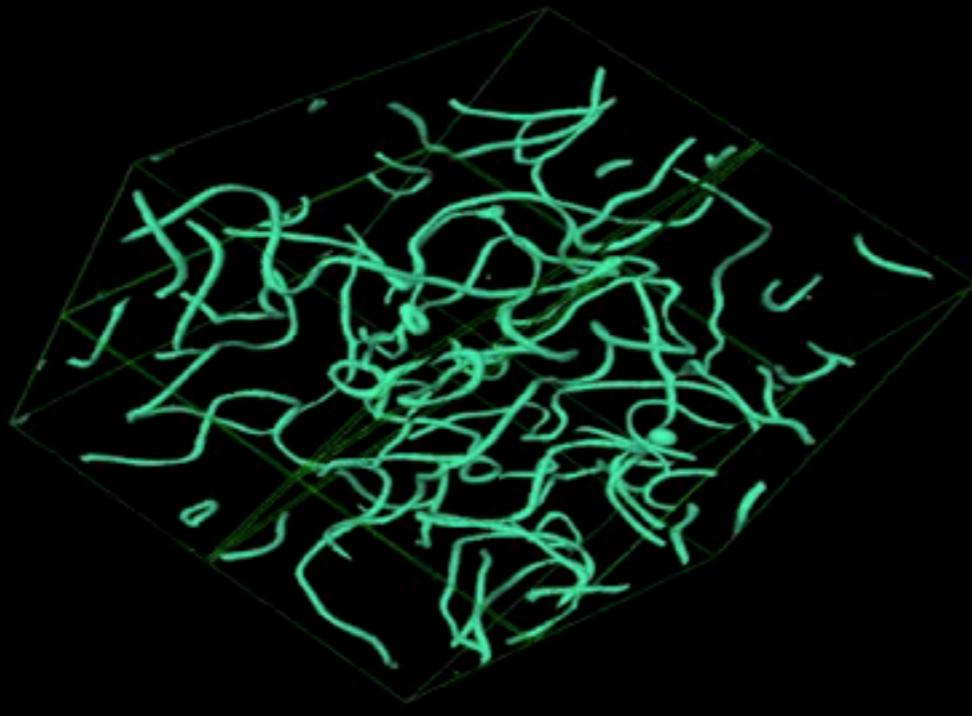
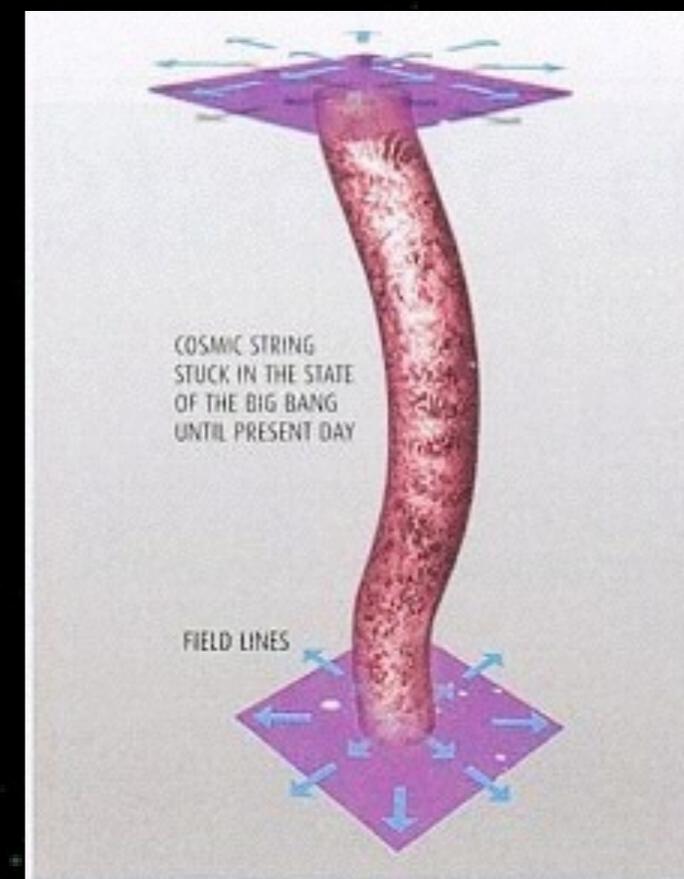
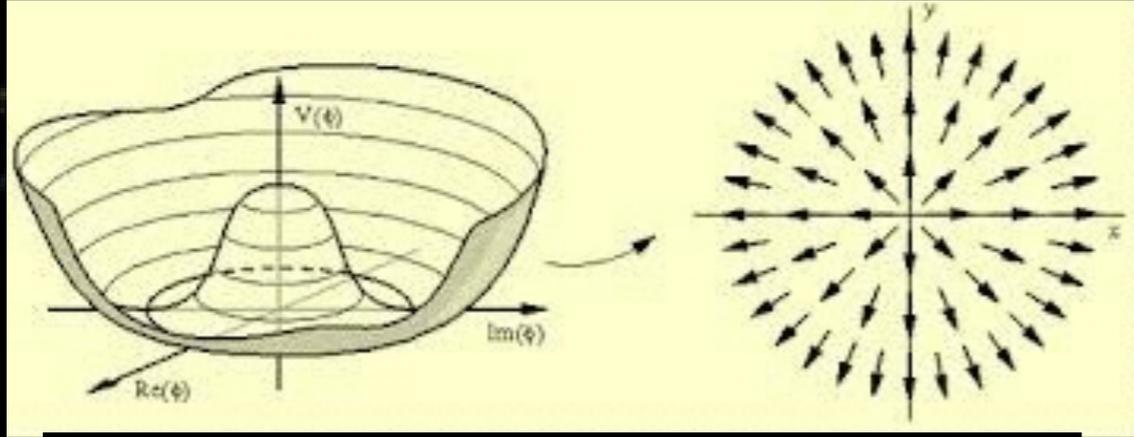
- ★ Exemple simple : Murs de domaine
- ★ Avec des potentiels plus complexes:
  - Cordes cosmiques
  - Monopoles
  - Textures

- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



# Autres défauts

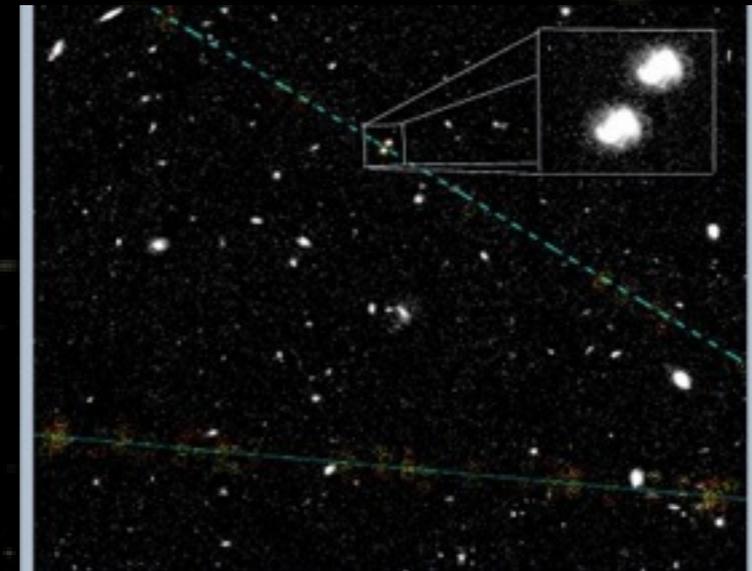
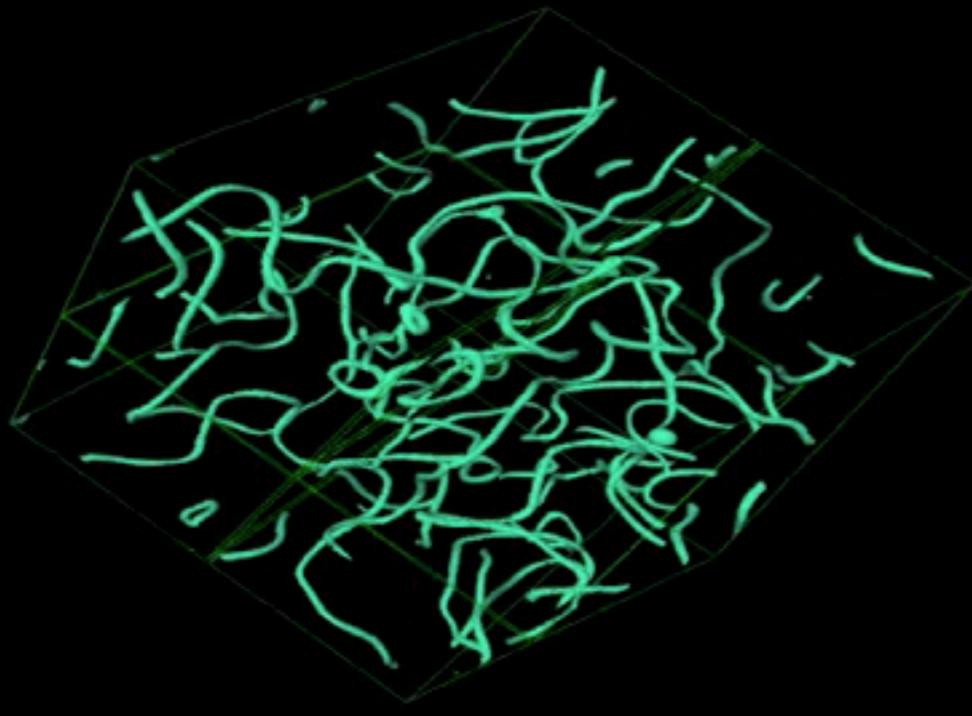
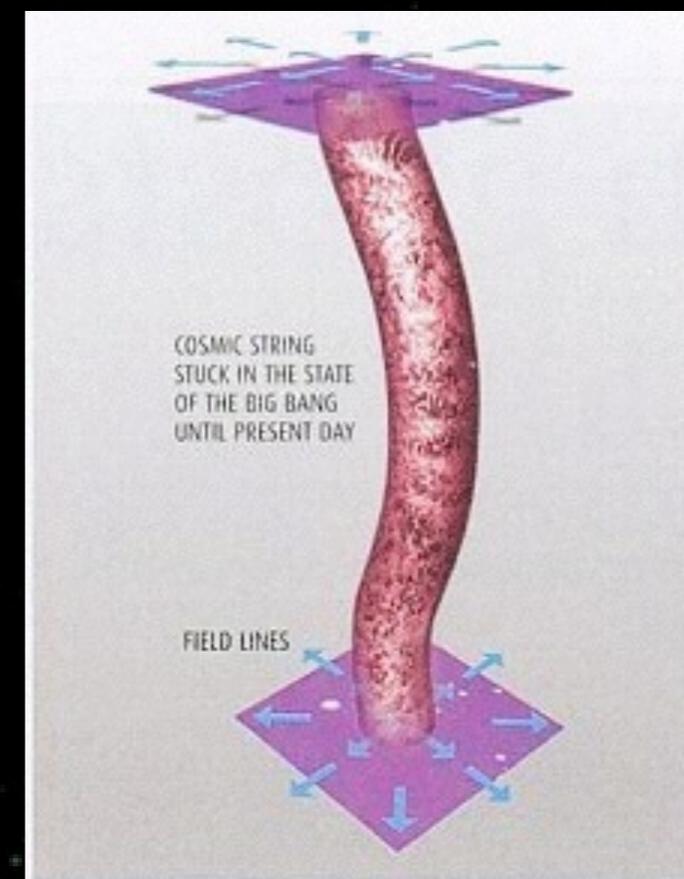
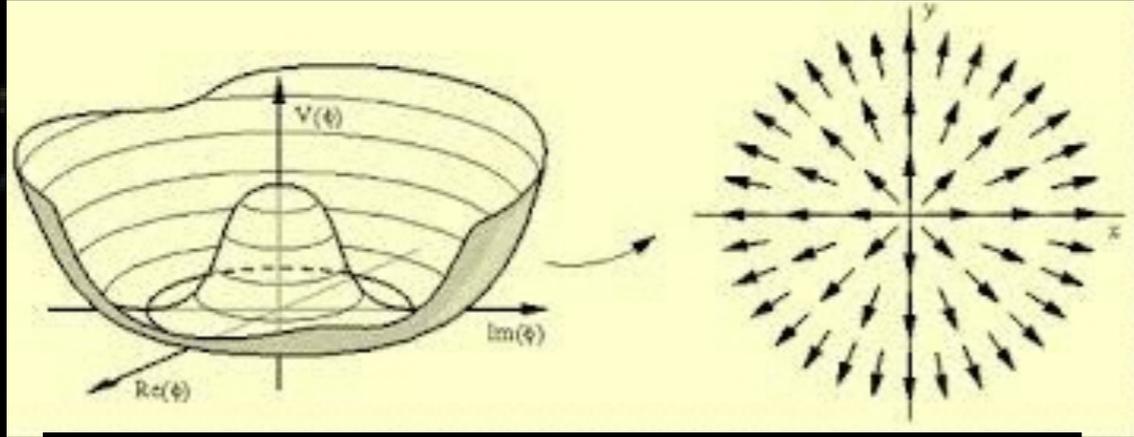
- Cordes cosmiques (2D)



- Monopoles magnétiques (3D)
- Textures (4D)

# Autres défauts

- Cordes cosmiques (2D)



- Monopoles magnétiques (3D)
- Textures (4D)

# Petite Histoire de l'Univers

temps

disparition anti-hadrons —  $10^{-4}$  sec  
confinement quarks —  $10^{-6}$  sec  
fin inflation —  $10^{-33}$  sec  
début ère rayonnement

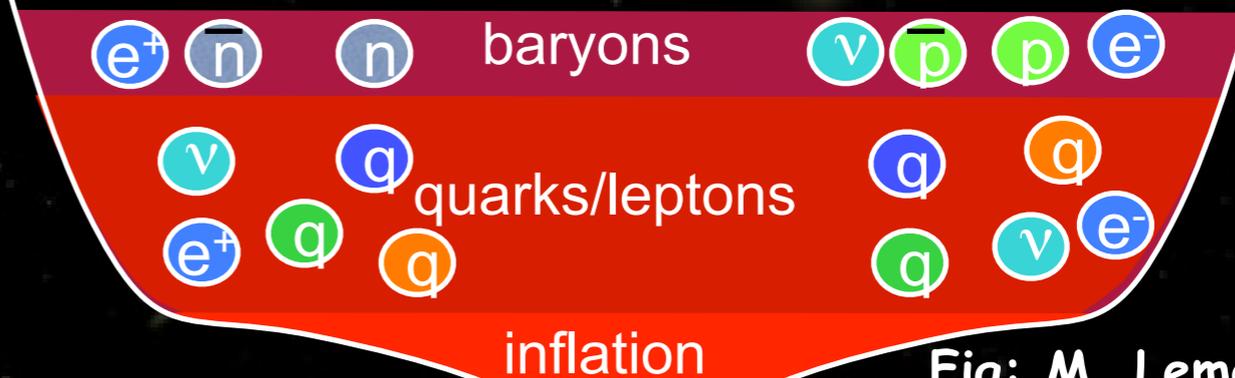


Fig: M. Lemoine



# Petite Histoire de l'Univers

temps



nucléosynthèse  
primordiale

3 mn

disparition  
anti-hadrons

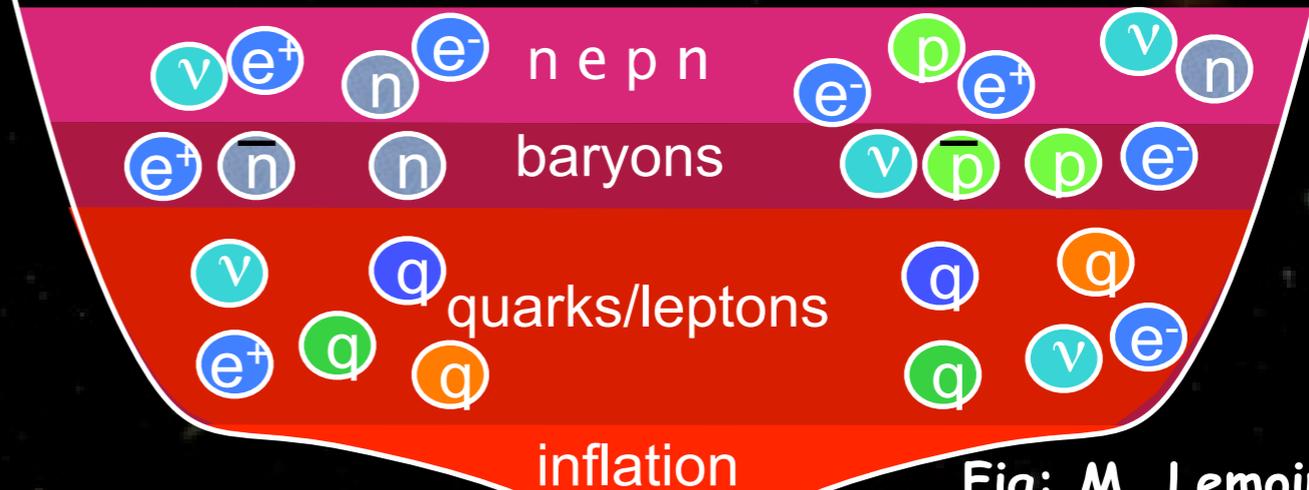
$10^{-4}$  sec

confinement  
quarks

$10^{-6}$  sec

fin inflation  
début ère  
rayonnement

$10^{-33}$  sec



# Nucléosynthèse primordiale (BBN)

- Début : ~ 3 min.

- ★ L'énergie des protons et neutrons devient assez faible pour former du deuterium ( $^2\text{H}$ ) par fusion nucléaire
- ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
- ★  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$

- Fin ~ 20 min.

- ★ L'univers est trop froid pour que la fusion nucléaire continue
- ★ Il n'y a plus de neutrons libres (T~900 sec)
- ★ Les abondances primordiales sont quasiment fixées
  - Sauf que les espèces radioactives se désintègrent ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$ )

- Remarquable accord avec les observations

**The Origin of Elements and the Separation of Galaxies**

G. GAMOW

*George Washington University, Washington, D. C.*

June 21, 1948



# Nucléosynthèse primordiale (BBN)

- Début : ~ 3 min.

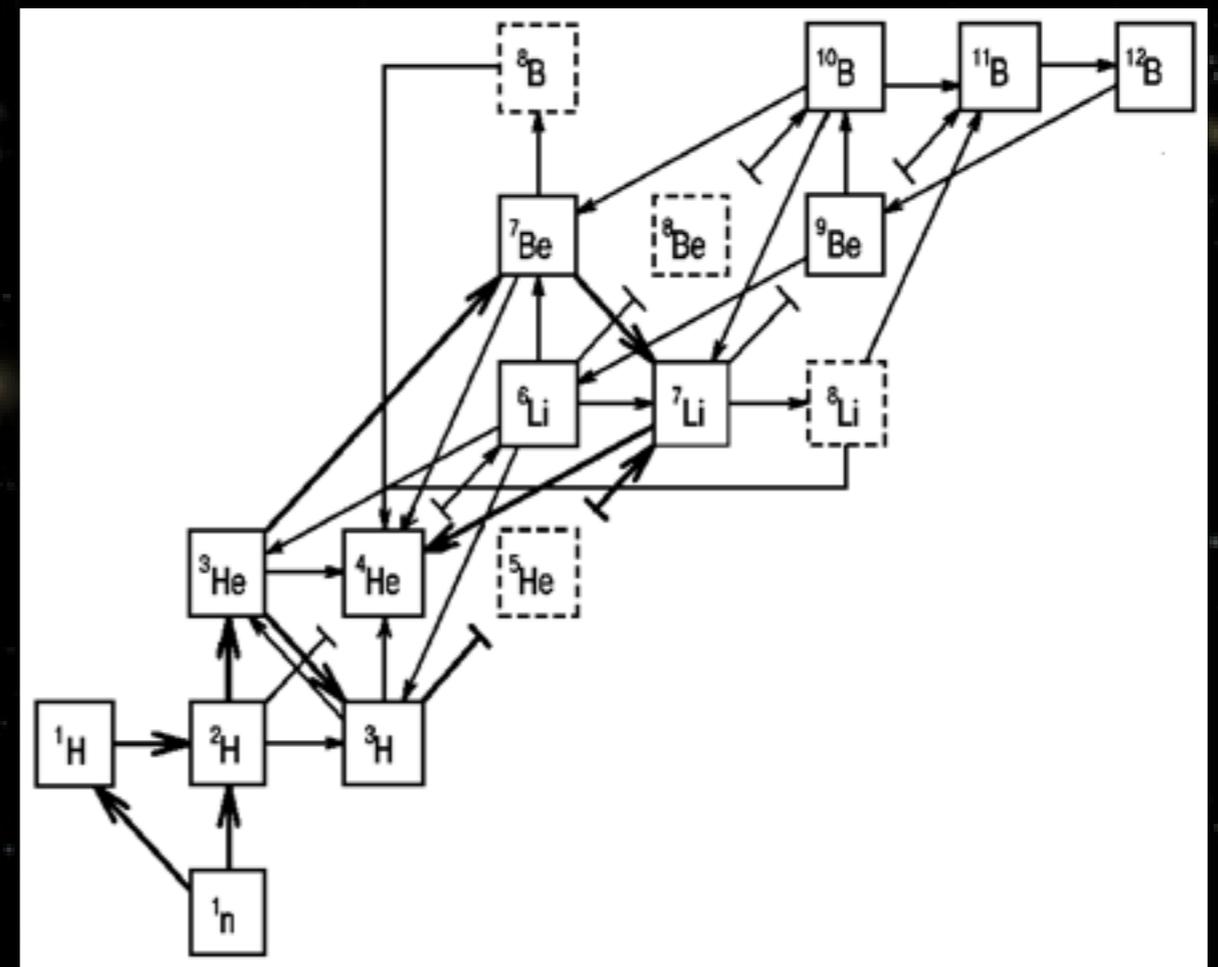
- ★ L'énergie des protons et neutrons devient assez faible pour former du deuterium ( $^2\text{H}$ ) par fusion nucléaire
- ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
- ★  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$

- Fin ~ 20 min.

- ★ L'univers est trop froid pour que la fusion nucléaire continue
- ★ Il n'y a plus de neutrons libres ( $T \sim 900$  sec)
- ★ Les abondances primordiales sont quasiment fixées
  - Sauf que les espèces radioactives se désintègrent ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$ )

- Remarquable accord avec les observations

**The Origin of Elements and the Separation of Galaxies**  
G. GAMOW  
George Washington University, Washington, D. C.  
June 21, 1948



# Nucléosynthèse primordiale (BBN)

- Début : ~ 3 min.

- ★ L'énergie des protons et neutrons devient assez faible pour former du deuterium ( $^2\text{H}$ ) par fusion nucléaire
- ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
- ★  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$

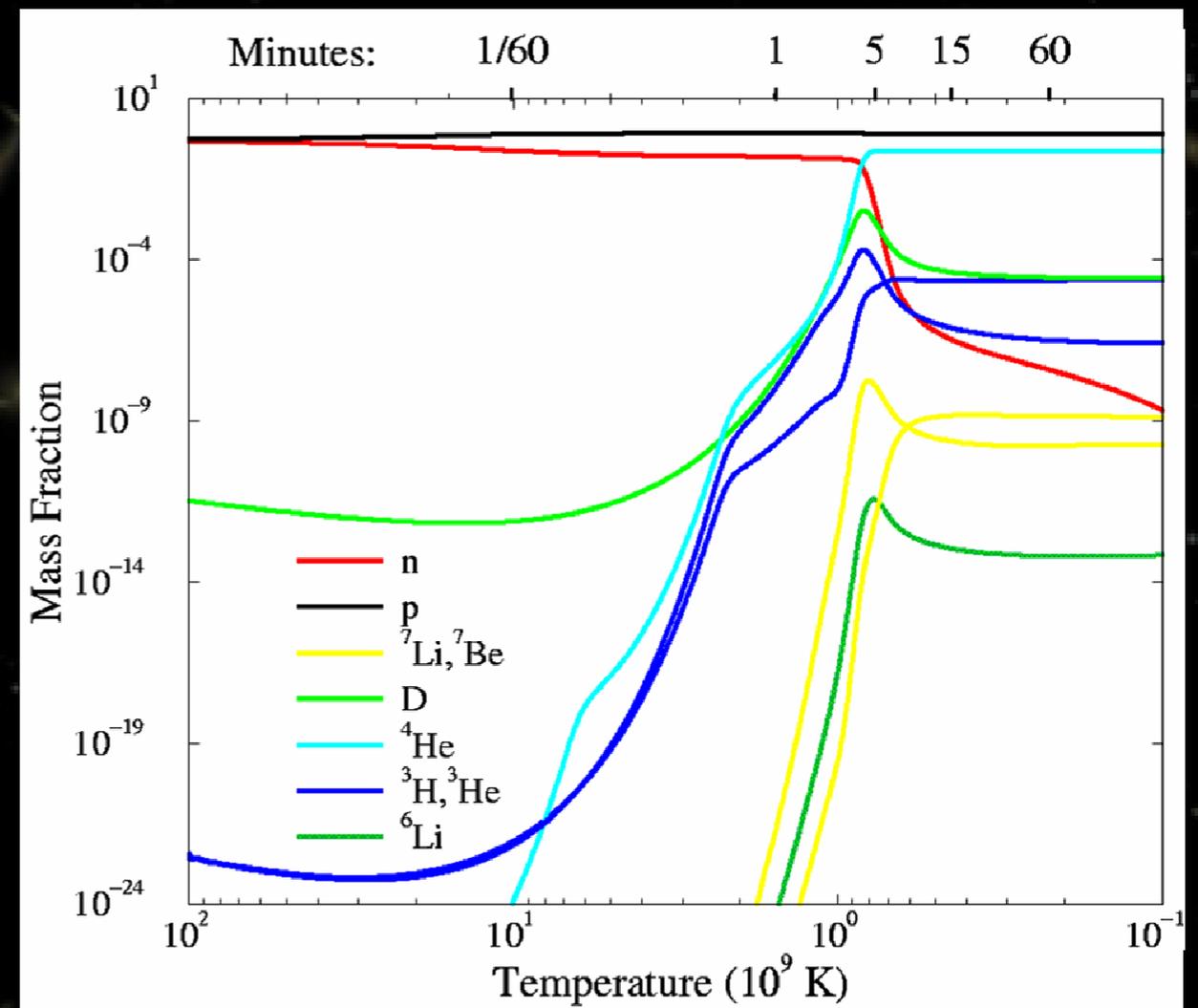
- Fin ~ 20 min.

- ★ L'univers est trop froid pour que la fusion nucléaire continue
- ★ Il n'y a plus de neutrons libres (T~900 sec)
- ★ Les abondances primordiales sont quasiment fixées
  - Sauf que les espèces radioactives se désintègrent ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$ )

- Remarquable accord avec les observations

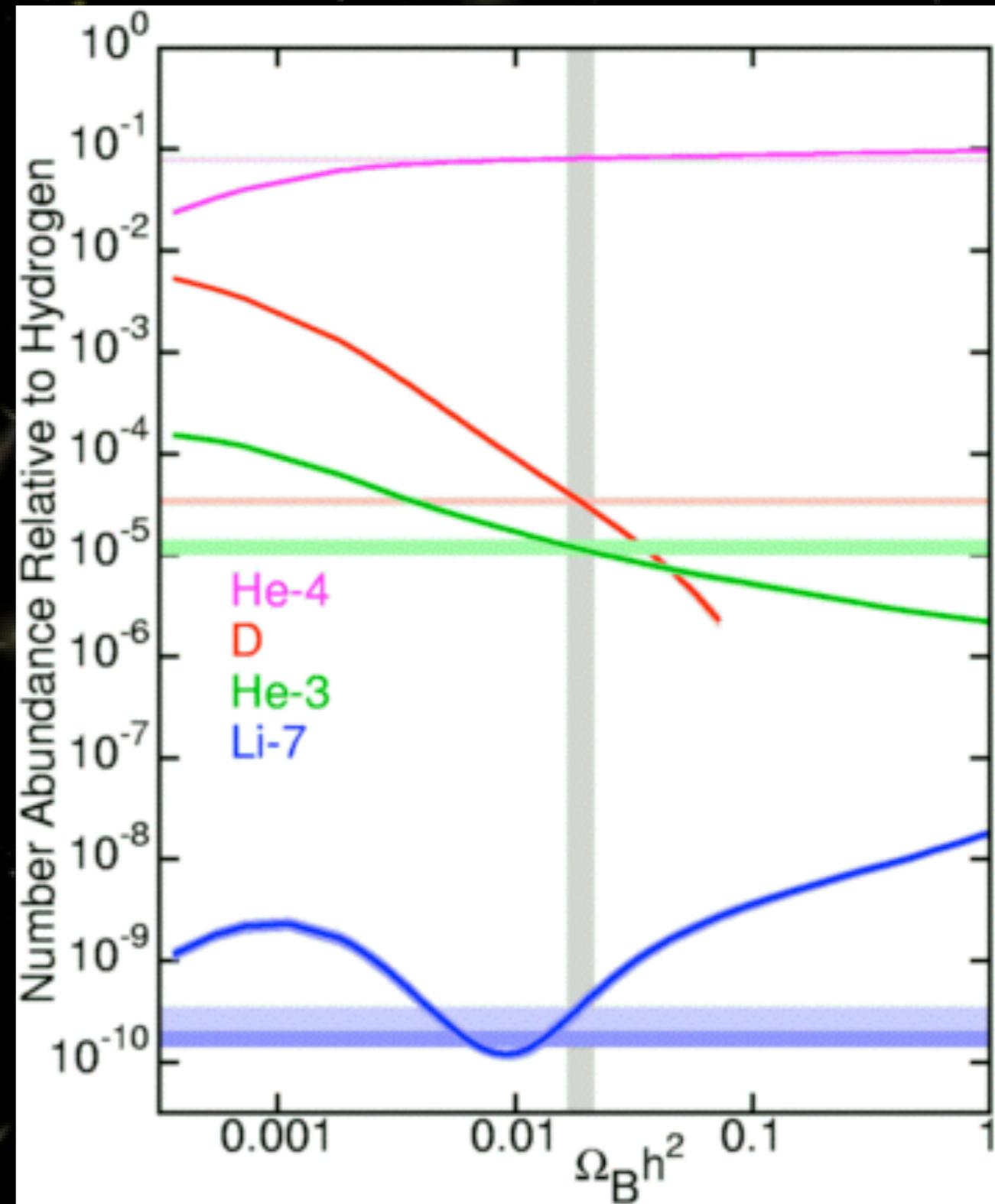
## The Origin of Elements and the Separation of Galaxies

G. GAMOW  
George Washington University, Washington, D. C.  
June 21, 1948



# Nucléosynthèse primordiale (BBN)

- Début : ~ 3 min.
  - ★ L'énergie des protons et neutrons devient assez faible pour former du deuterium ( $^2\text{H}$ ) par fusion nucléaire
  - ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
  - ★  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$
- Fin ~ 20 min.
  - ★ L'univers est trop froid pour que la fusion nucléaire continue
  - ★ Il n'y a plus de neutrons libres ( $T \sim 900$  sec)
  - ★ Les abondances primordiales sont quasiment fixées
    - Sauf que les espèces radioactives se désintègrent ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$ )
- Remarquable accord avec les observations



# Nucléosynthèse primordiale (BBN)

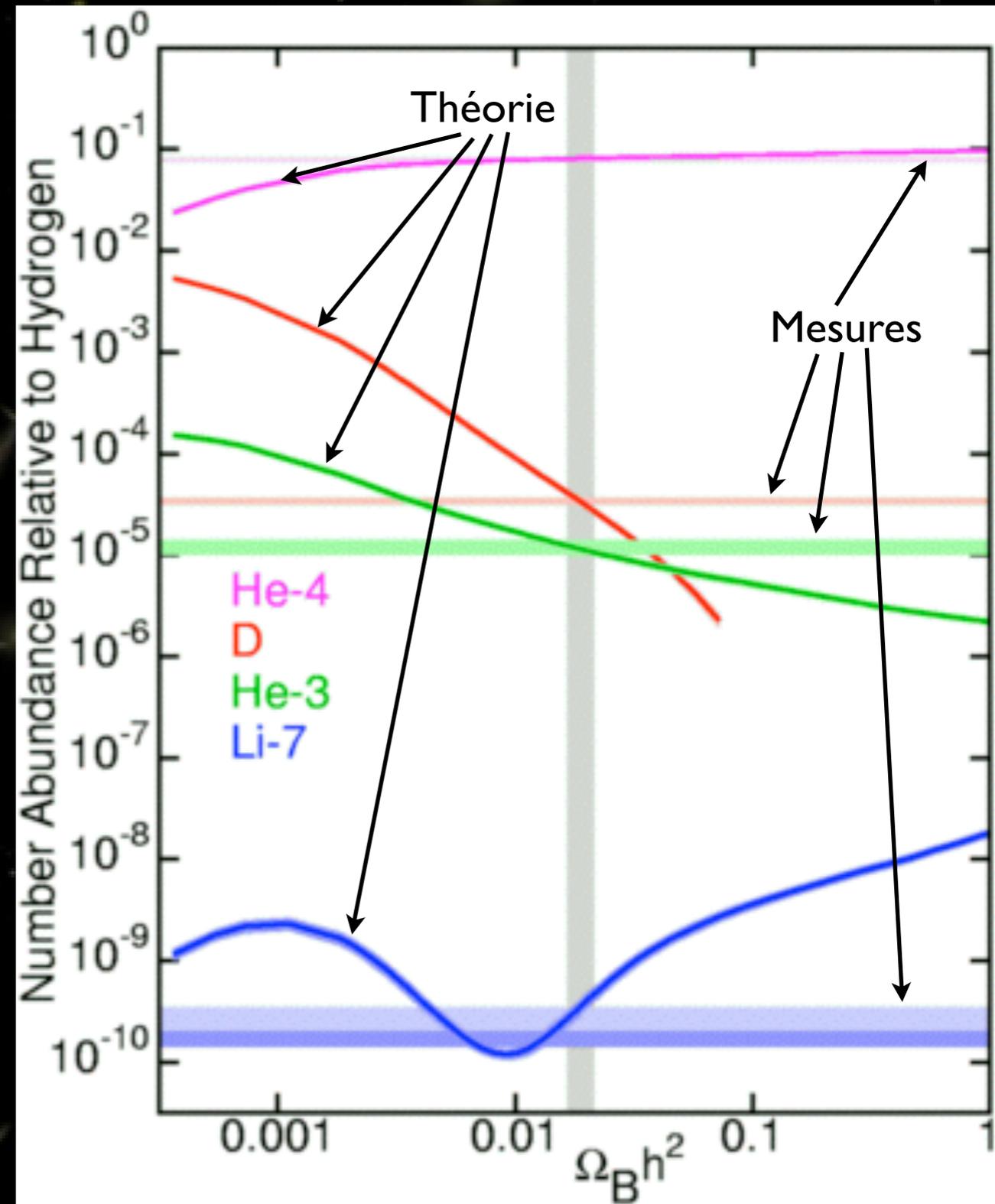
- Début : ~ 3 min.

- ★ L'énergie des protons et neutrons devient assez faible pour former du deuterium ( $^2\text{H}$ ) par fusion nucléaire
- ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
- ★  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$

- Fin ~ 20 min.

- ★ L'univers est trop froid pour que la fusion nucléaire continue
- ★ Il n'y a plus de neutrons libres ( $T \sim 900$  sec)
- ★ Les abondances primordiales sont quasiment fixées
  - Sauf que les espèces radioactives se désintègrent ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$ )

- Remarquable accord avec les observations



# Nucléosynthèse primordiale (BBN)

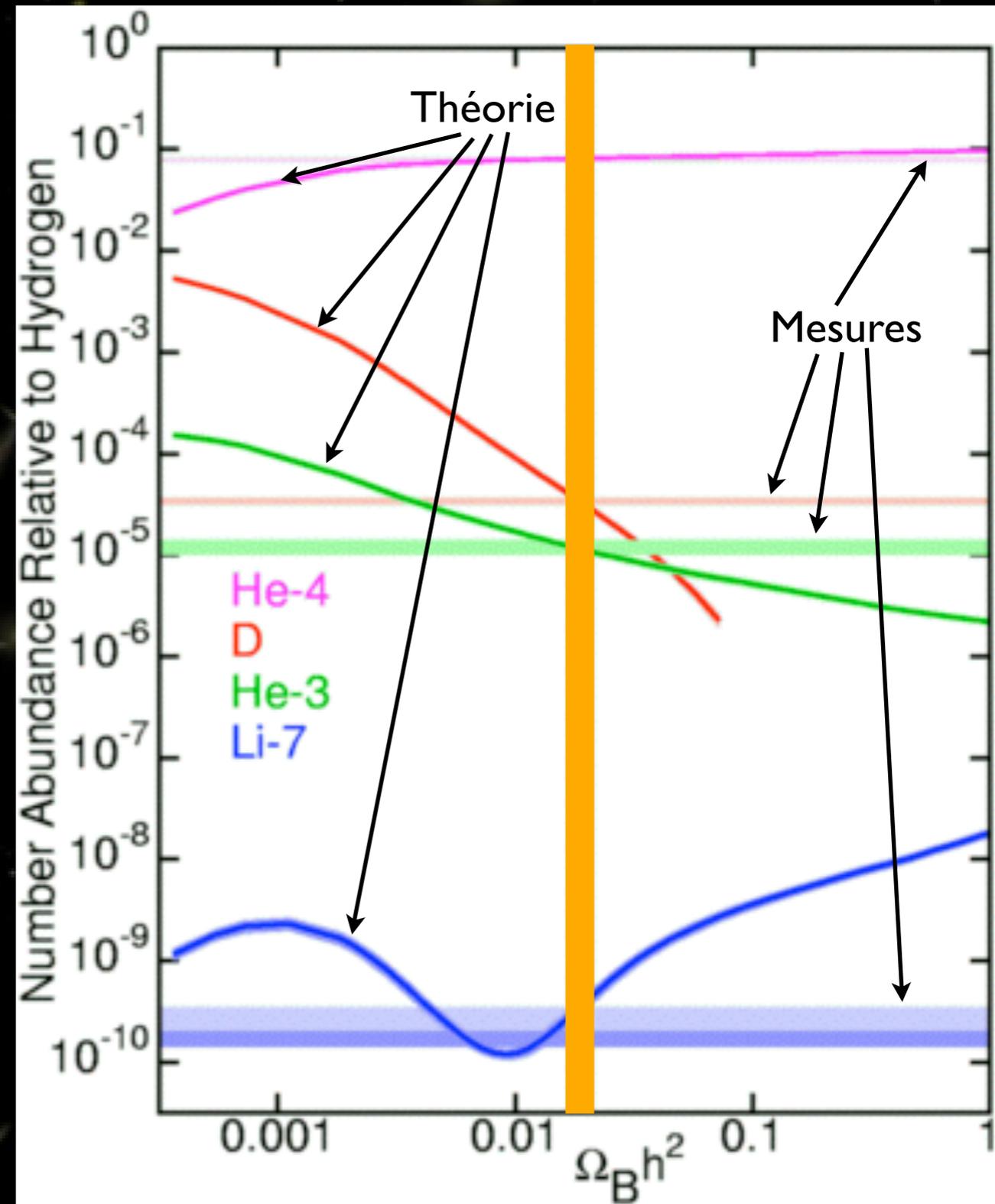
- Début : ~ 3 min.

- ★ L'énergie des protons et neutrons devient assez faible pour former du deuterium ( $^2\text{H}$ ) par fusion nucléaire
- ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
- ★  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$

- Fin ~ 20 min.

- ★ L'univers est trop froid pour que la fusion nucléaire continue
- ★ Il n'y a plus de neutrons libres ( $T \sim 900$  sec)
- ★ Les abondances primordiales sont quasiment fixées
  - Sauf que les espèces radioactives se désintègrent ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$ )

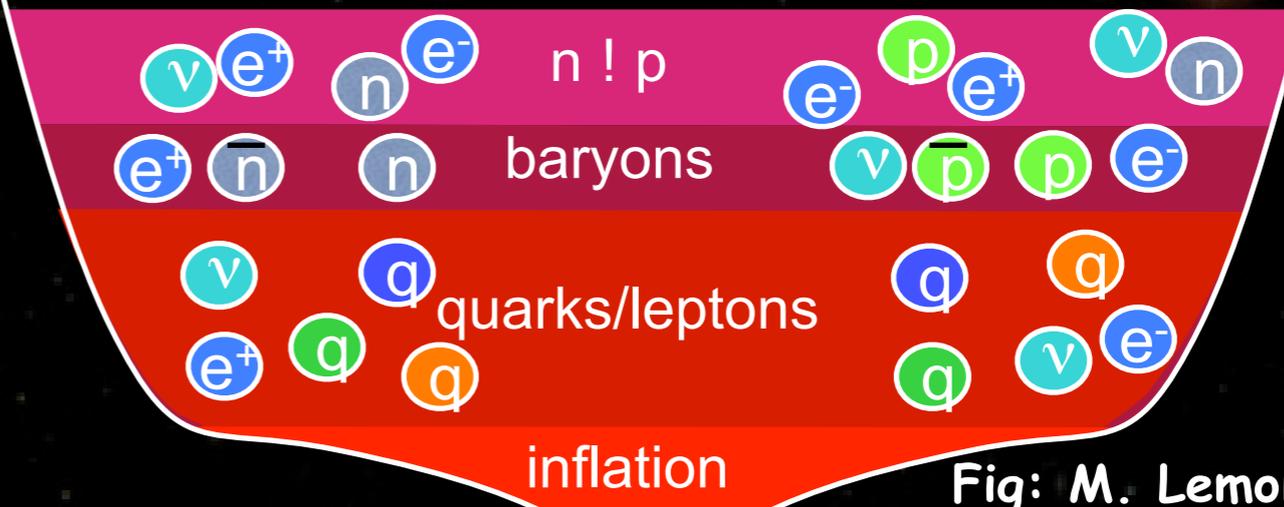
- Remarquable accord avec les observations



# Petite Histoire de l'Univers

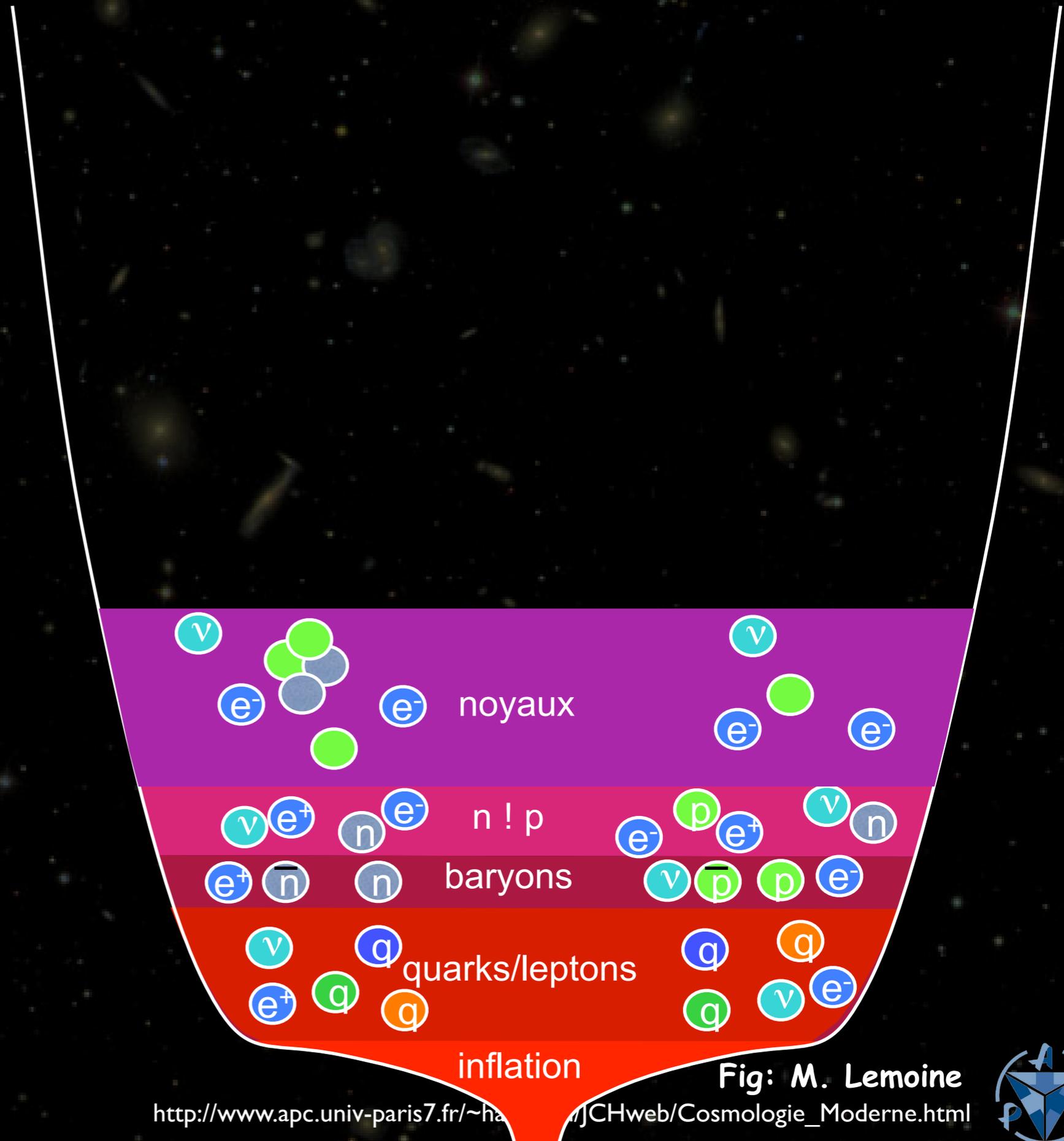
temps

disparition anti-hadrons —  $10^{-4}$  sec  
confinement quarks —  $10^{-6}$  sec  
fin inflation —  $10^{-33}$  sec  
début ère rayonnement



# Petite Histoire de l'Univers

temps



nucléosynthèse  
primordiale

3 mn

disparition  
anti-hadrons

$10^{-4}$  sec

confinement  
quarks

$10^{-6}$  sec

fin inflation  
début ère

$10^{-33}$  sec

rayonnement

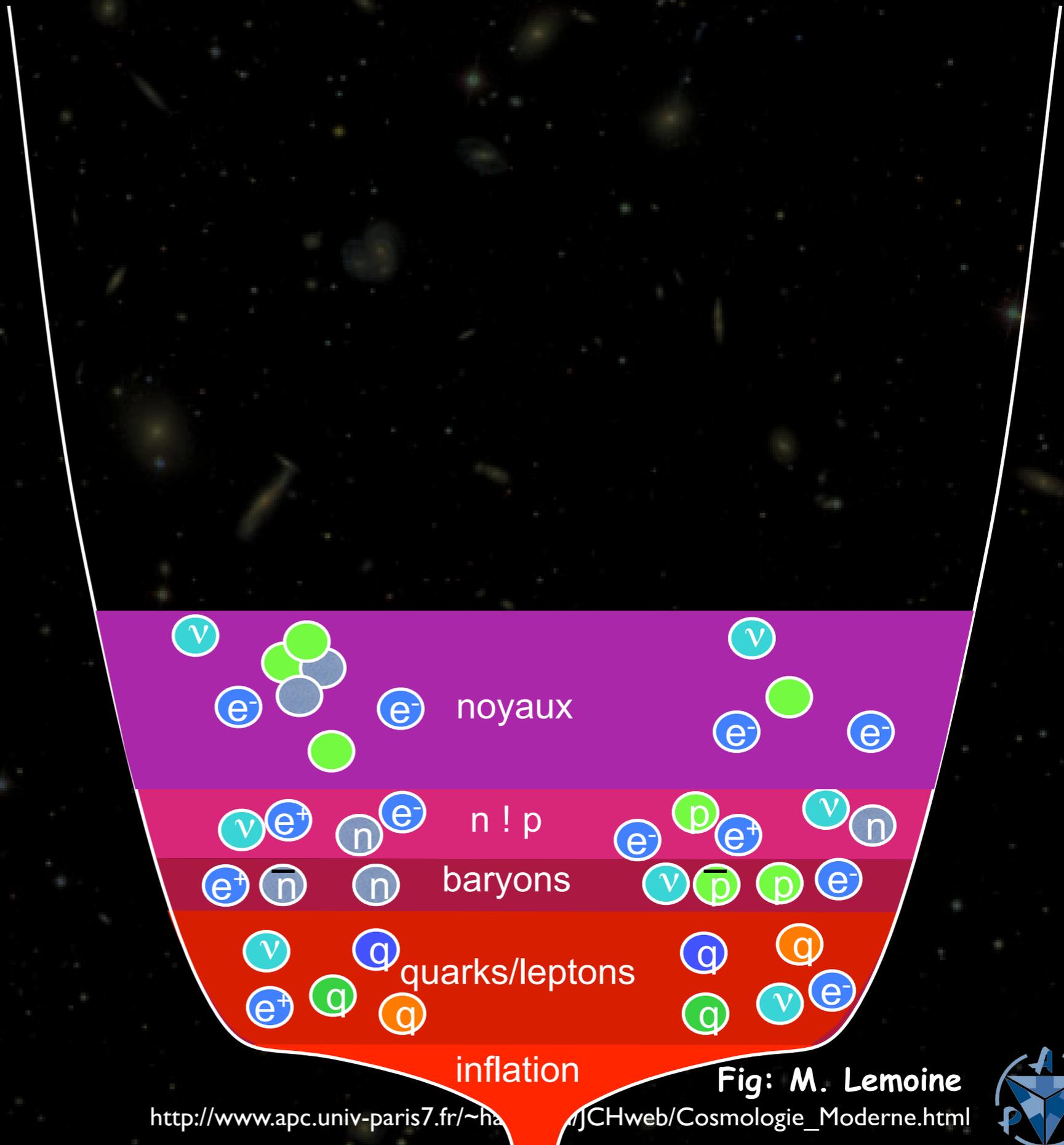
inflation

Fig: M. Lemoine



# Petite Histoire de l'Univers

temps



égalité  
matière —  
rayonnement — 10 000 ans

nucléosynthèse  
primordiale — 3 mn

disparition  
anti-hadrons —  $10^{-4}$  sec

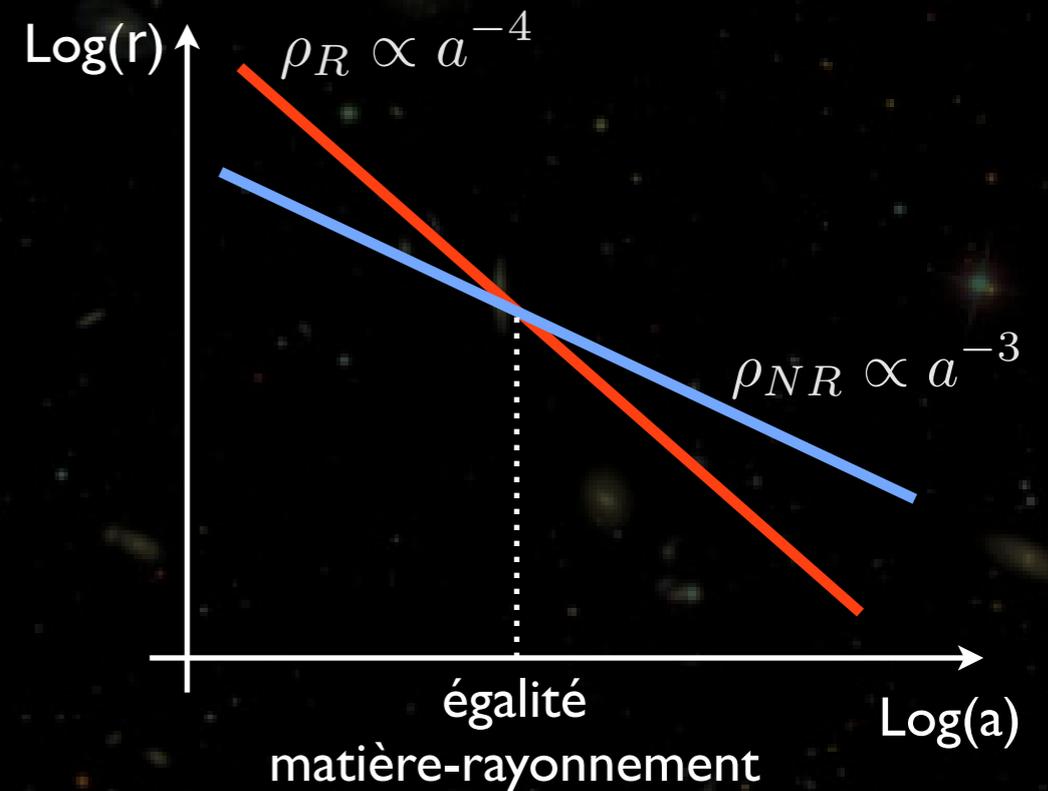
confinement  
quarks —  $10^{-6}$  sec

fin inflation —  
début ère  
rayonnement —  $10^{-33}$  sec



# Égalité Matière-Rayonnement

- Le rayonnement se dilue comme:  $\rho_R \propto a^{-4}$
- La matière non relativiste se dilue comme:  $\rho_{NR} \propto a^{-3}$
- L'univers jeune était dominé par le rayonnement
- La matière finit forcément par dominer
  - ★  $1 + z_{eq} = 2.4 \times 10^4 \Omega_0 h_0^2 \sim 3175$
  - ★ avant l'égalité la matière ne peut pas s'effondrer à cause de la pression de radiation



à partir de l'égalité matière-rayonnement, les structures peuvent s'effondrer sous leur propre gravité !



# calcul de $Z_{eq}$

- Radiation:  $\rho_R \propto a^{-4}$   $\Omega_R = \frac{8\pi G \rho_R}{3H^2}$
- Matière:  $\rho_{NR} \propto a^{-3}$   $\Omega_{NR} = \frac{8\pi G \rho_{NR}}{3H^2}$

$$\Rightarrow \frac{\Omega_R}{\Omega_{NR}} = \frac{\rho_R}{\rho_{NR}} = \frac{\Omega_{R,0} \times (1+z)^4}{\Omega_{NR,0} \times (1+z)^3} = \frac{\Omega_{R,0}}{\Omega_{NR,0}} \times (1+z)$$

★ Photons : le CMB est un corps noir à 2.725 K

- Densité d'énergie par la loi de Stefan

$$\rho_{\gamma,0} c^2 = 4\sigma T^4 / c \text{ J.m}^{-3}$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ M.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

$$\rho_{\gamma,0} c^2 = \frac{4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 2.725^4}{3 \times 10^8} \text{ J}$$

$$= 4.17 \times 10^{14} \text{ J.m}^{-3}$$

$$\rho_{\gamma,0} = 4.64 \times 10^{-31} \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\Omega_{\gamma,0} = \frac{8\pi G \rho_{\gamma,0}}{3H_0^2} = 2.47 h^{-2} \times 10^{-5}$$



# calcul de $z_{eq}$

★ Neutrinos: contribution de  $\sim 70\%$  supplémentaire

★ donc pour le rayonnement:  $\Omega_{R,0} \simeq 4.2h^{-2} \times 10^{-5}$

$$(1 + z_{eq}) = \frac{\Omega_{NR,0}}{\Omega_{R,0}}$$
$$= \frac{h^2 \times \Omega_{m,0}}{4.2 \times 10^{-5}}$$

$$z_{eq} = 23800 \times h^2 \times \Omega_{m,0}$$

$$z_{eq} \simeq 3600$$

