

Cosmologie Moderne

Cours 9



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

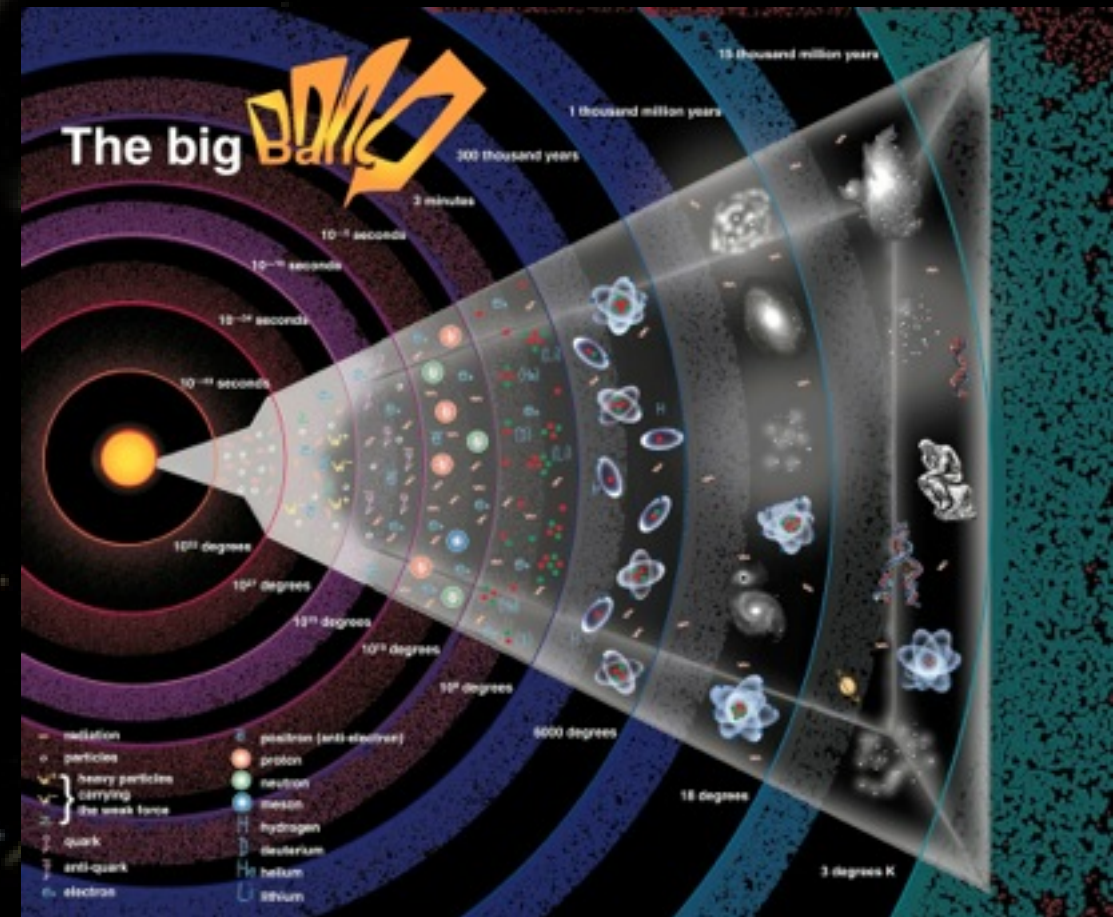
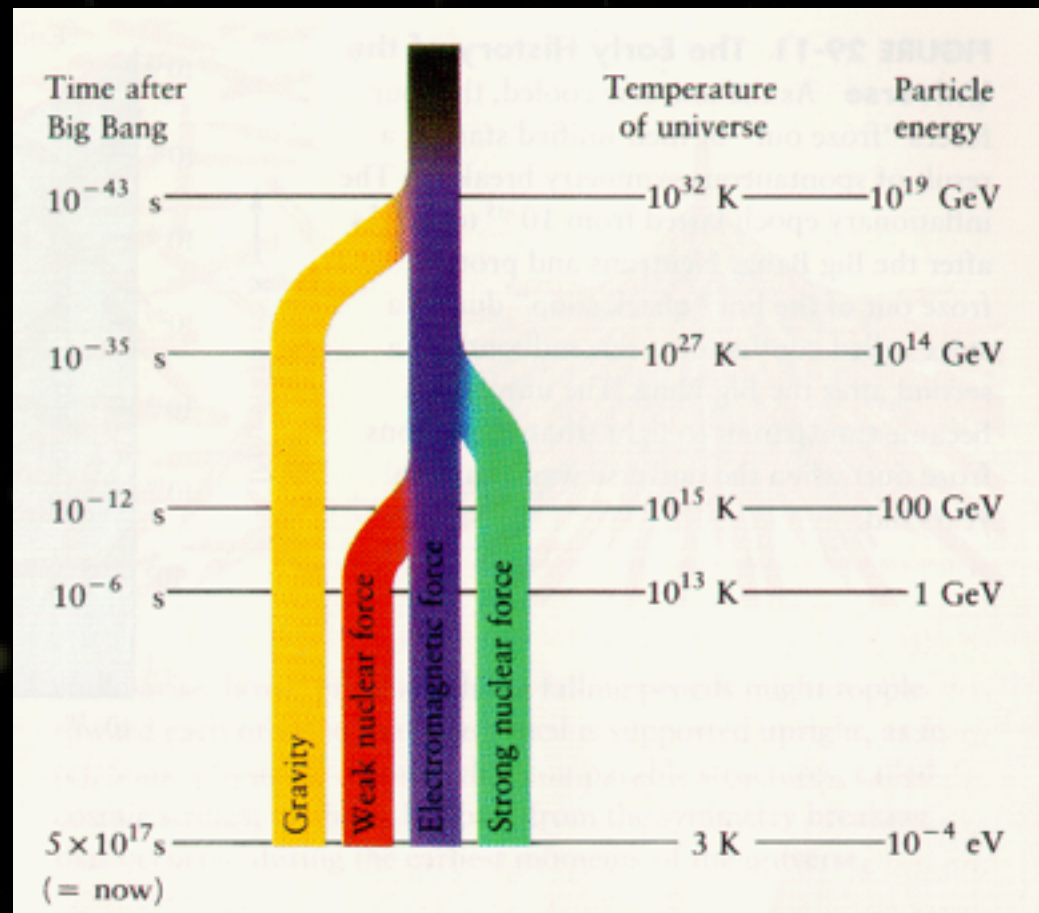
Vue d'ensemble de la cosmologie

- 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

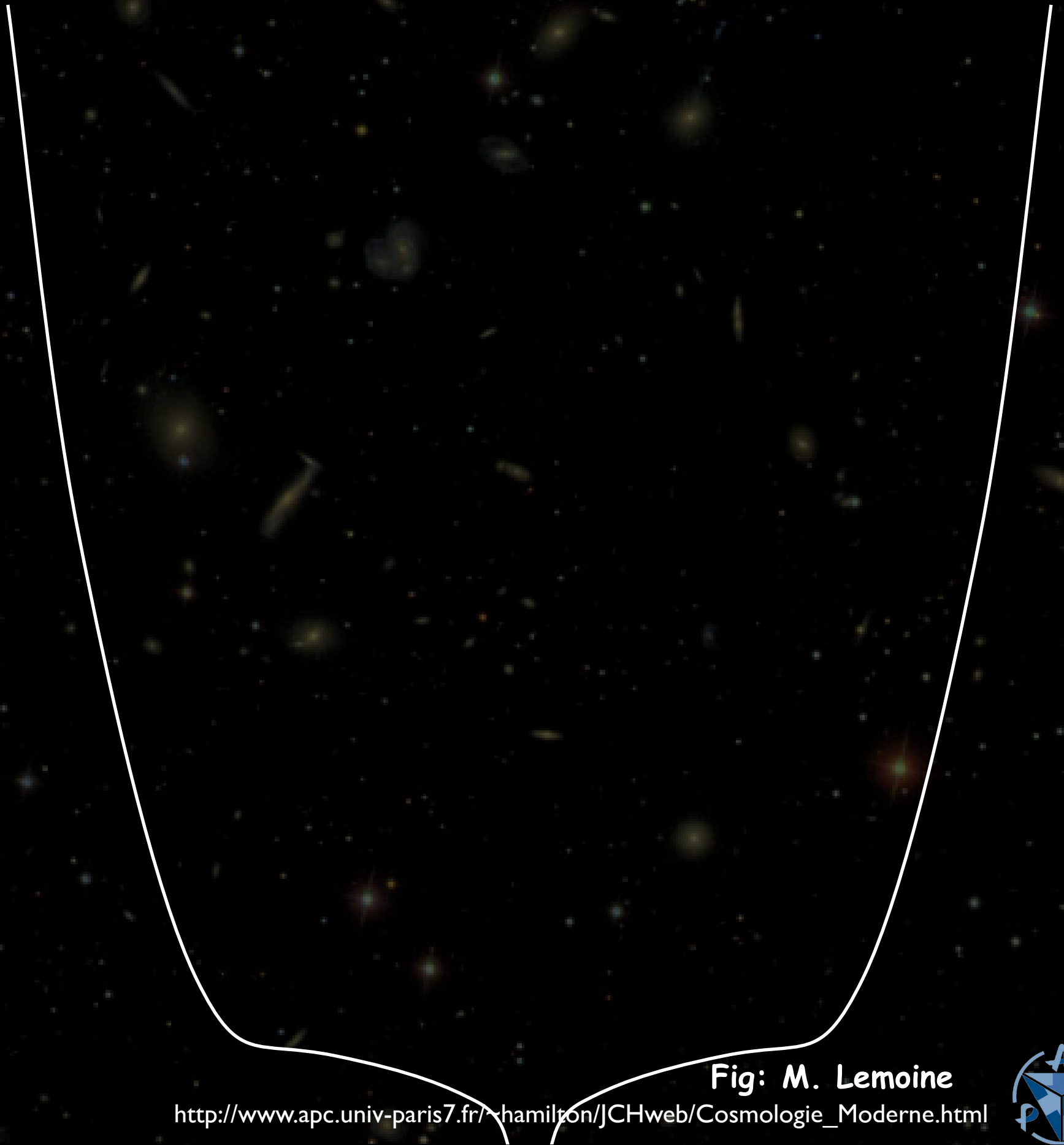
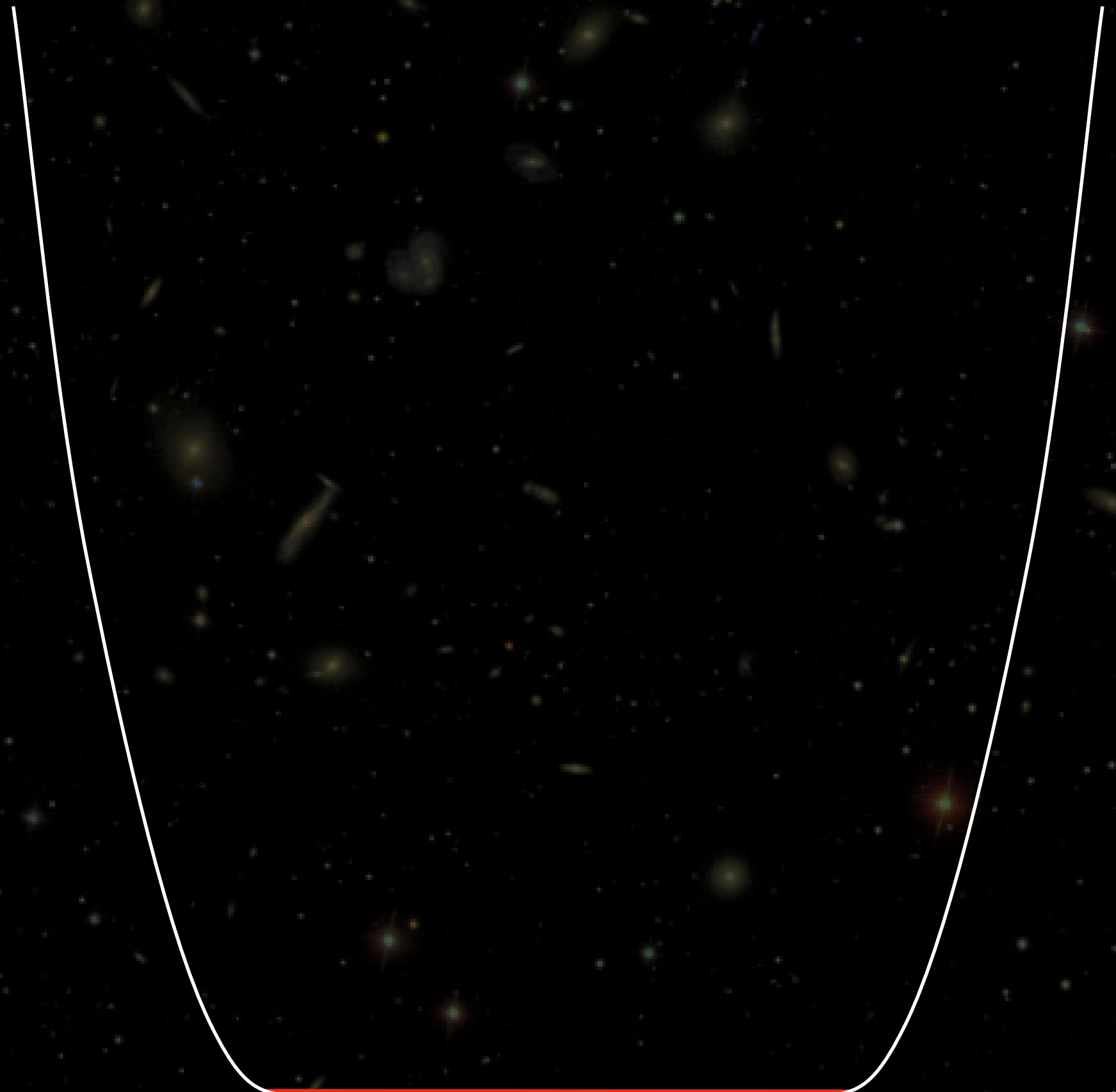


Fig: M. Lemoine



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

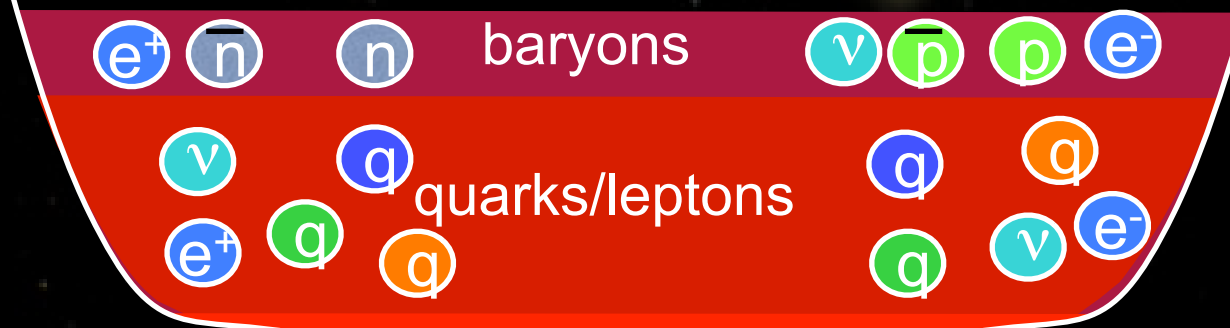


Fig: M. Lemoine



Transitions de phase

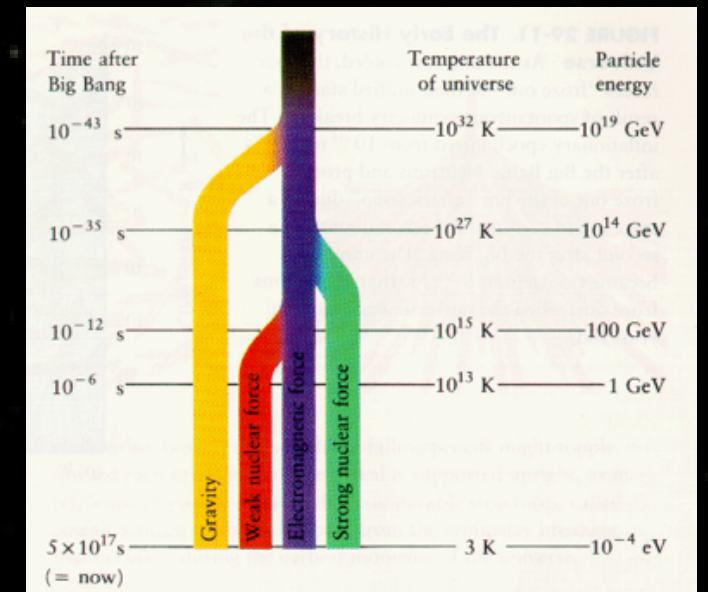
- Séparation entre interactions

- ★ 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

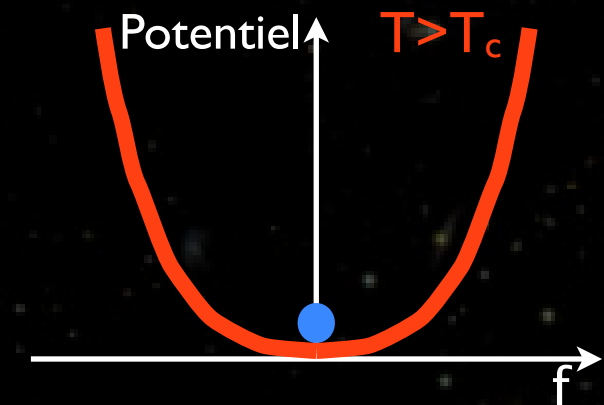
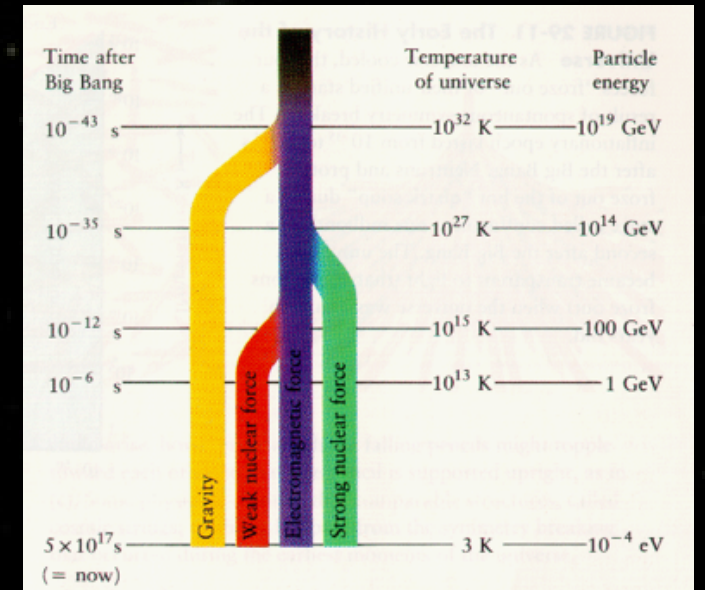
- Séparation entre interactions

- ★ 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

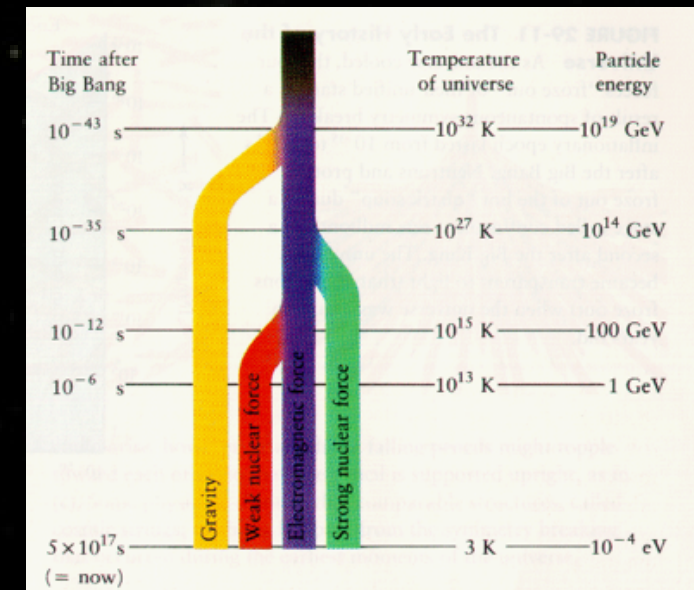
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Transitions de phase

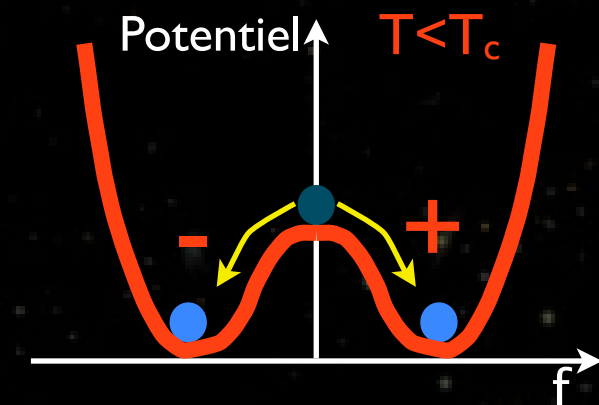
- Séparation entre interactions

- ★ 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



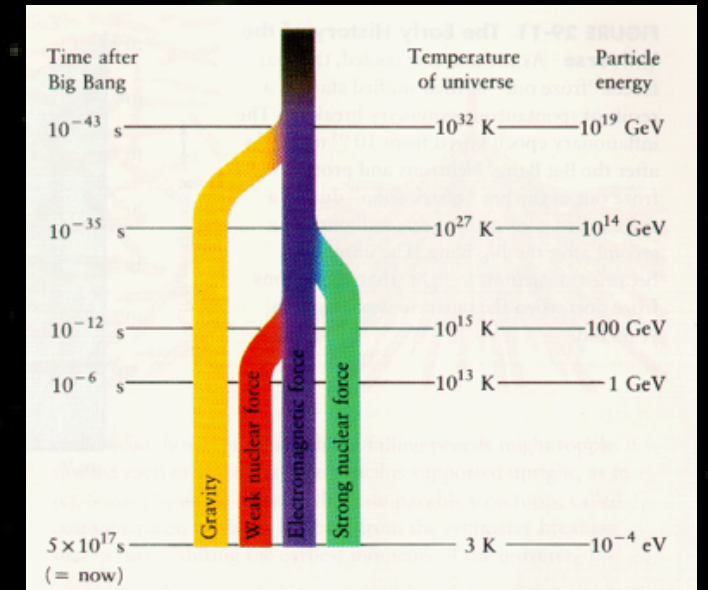
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Transitions de phase

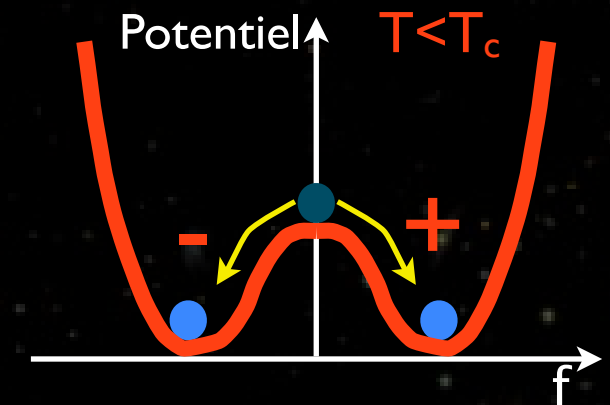
- Séparation entre interactions

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

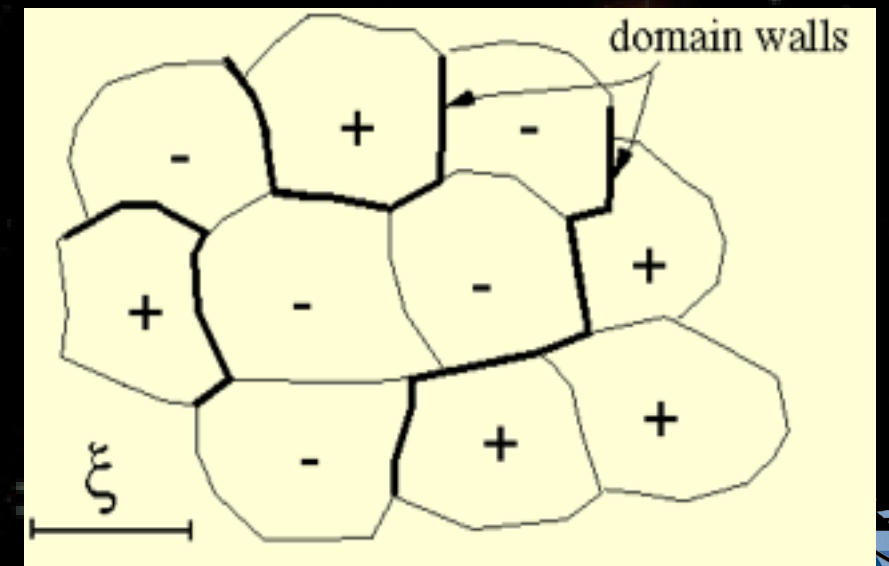


- Défauts topologiques

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



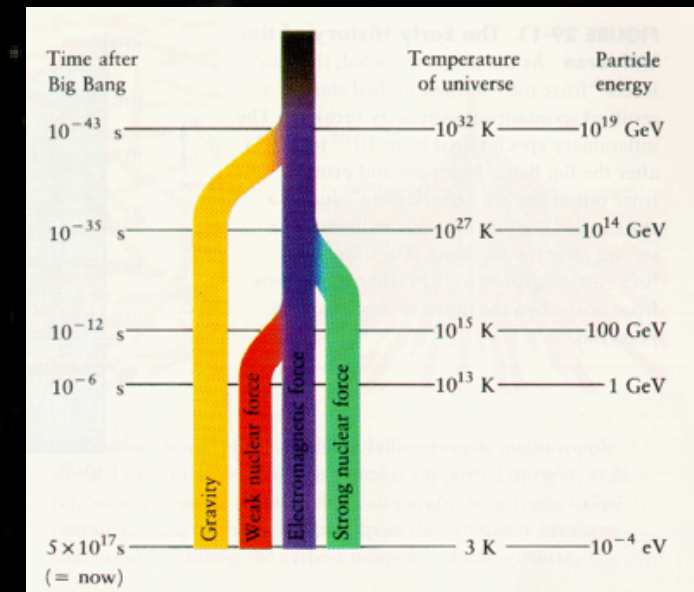
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Transitions de phase

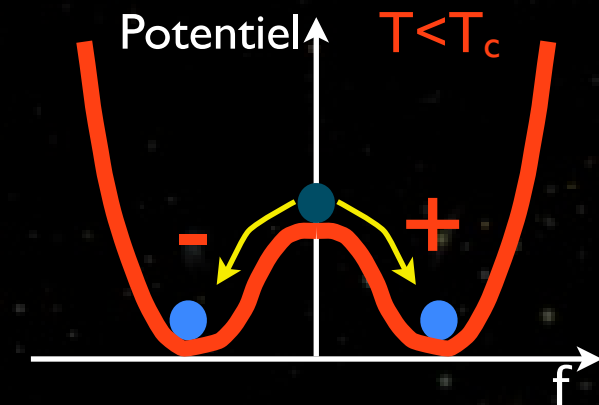
- Séparation entre interactions

- ★ 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

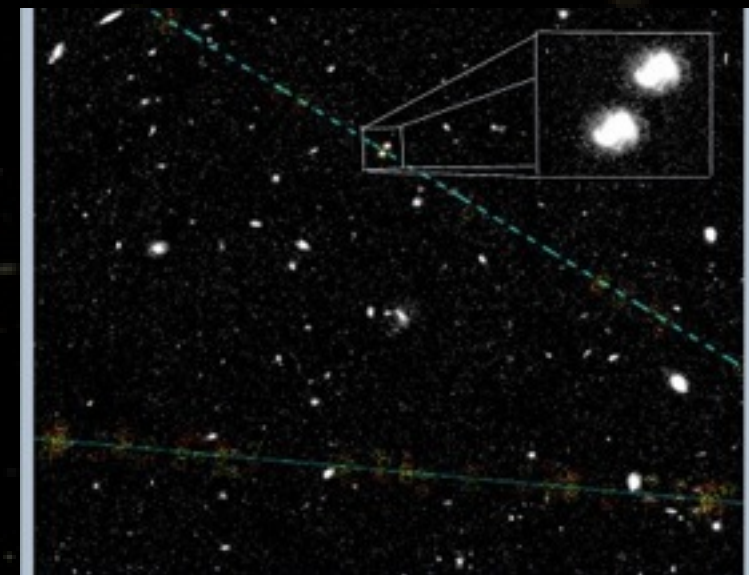
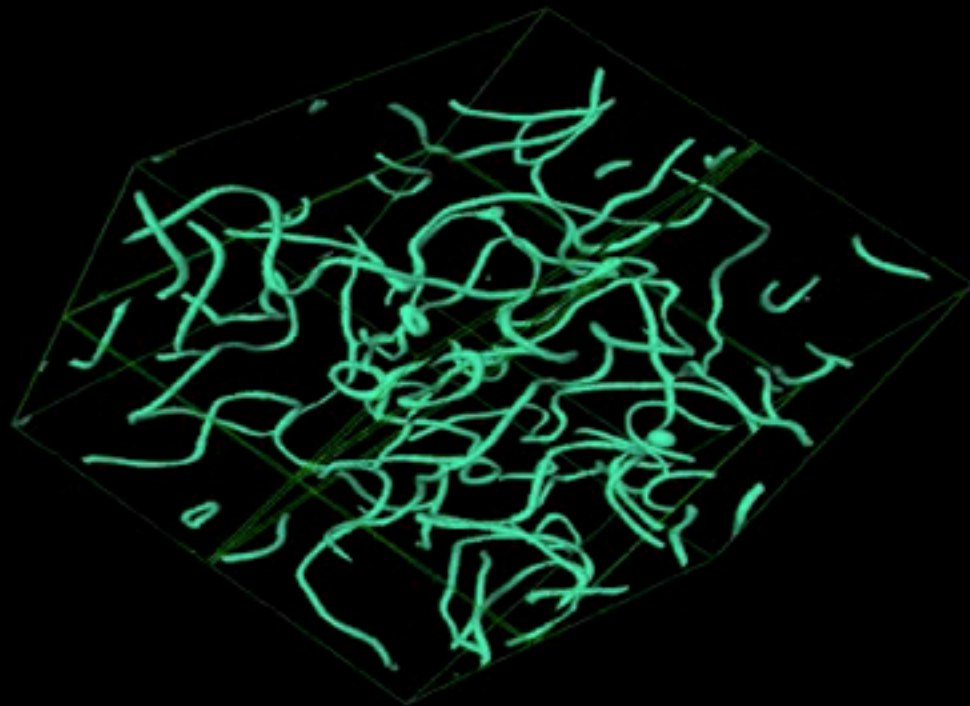
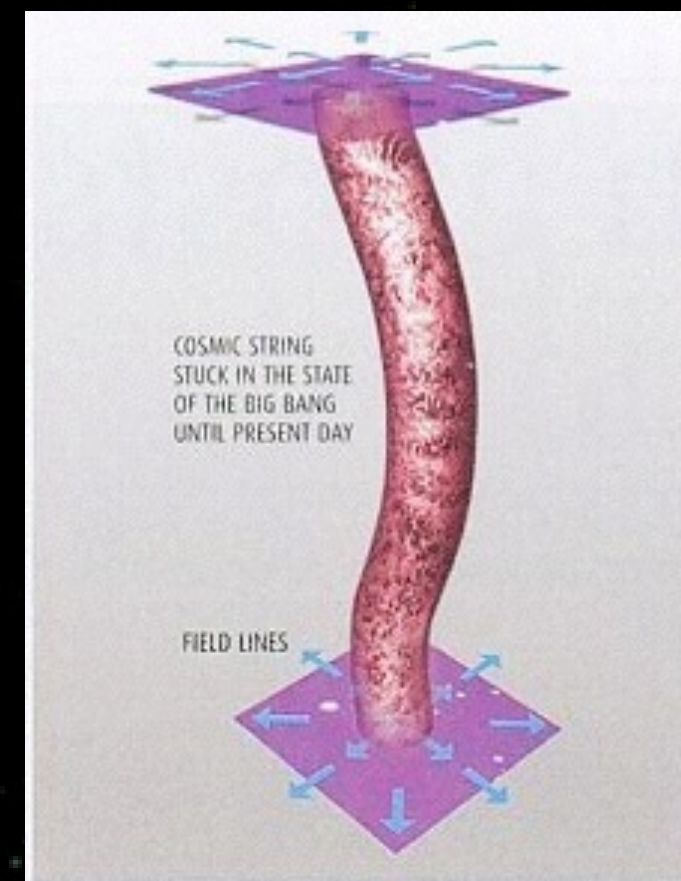
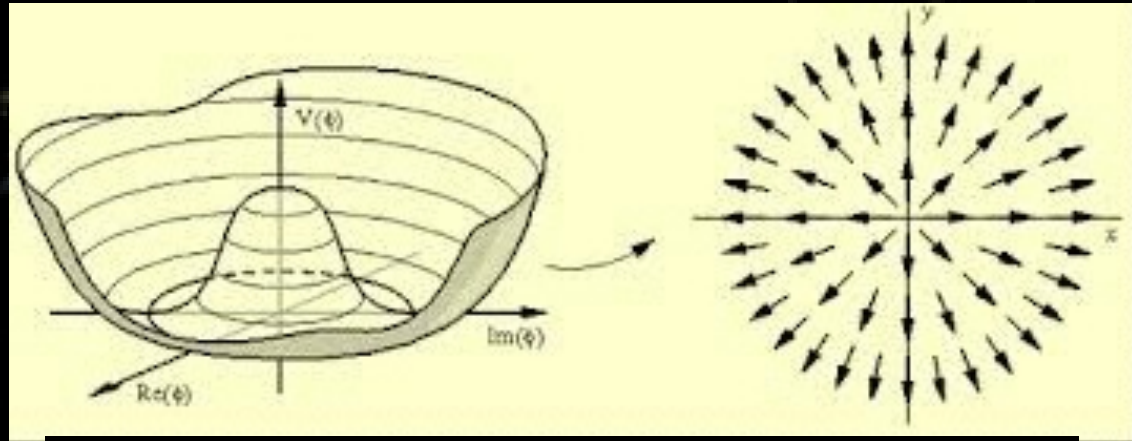


- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Autres défauts

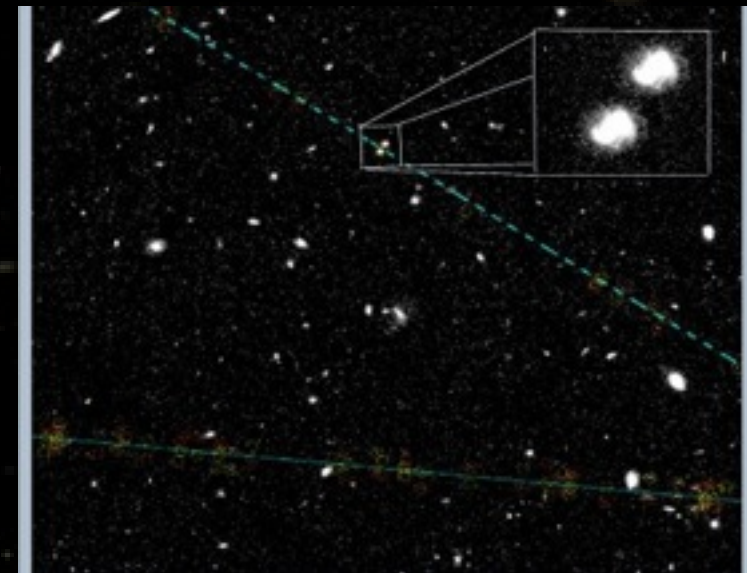
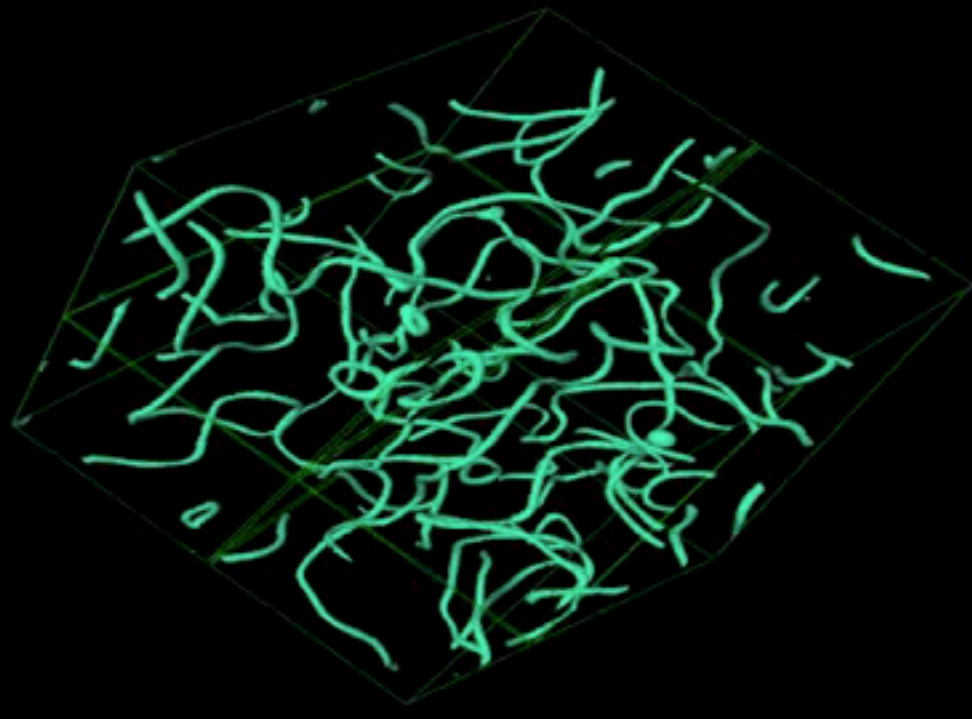
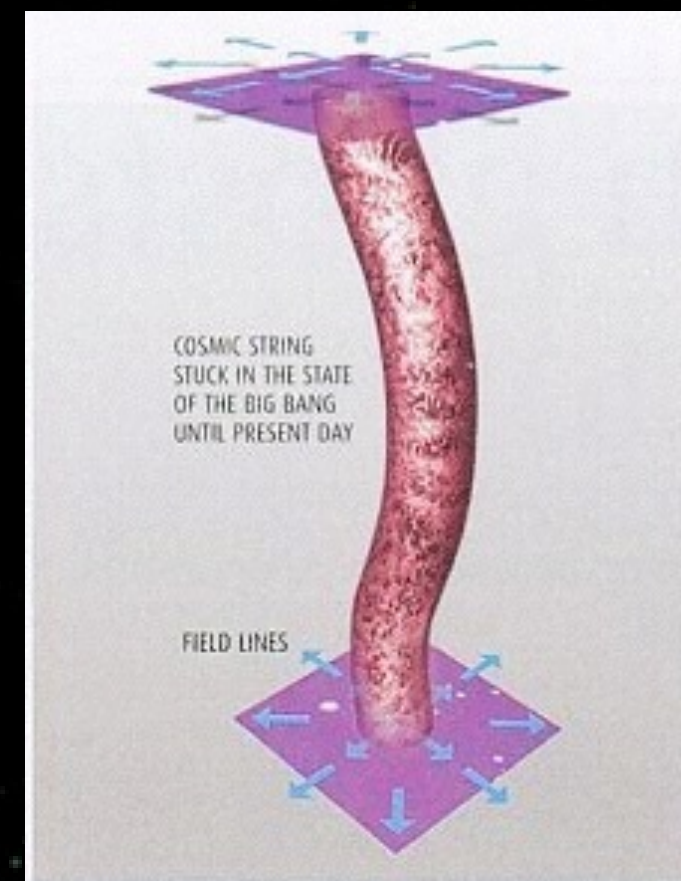
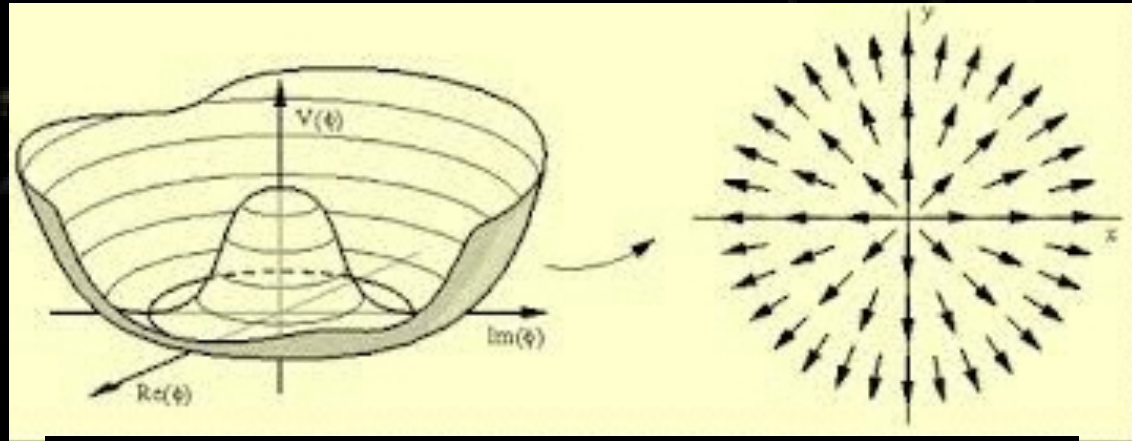
- Cordes cosmiques (2D)



- 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

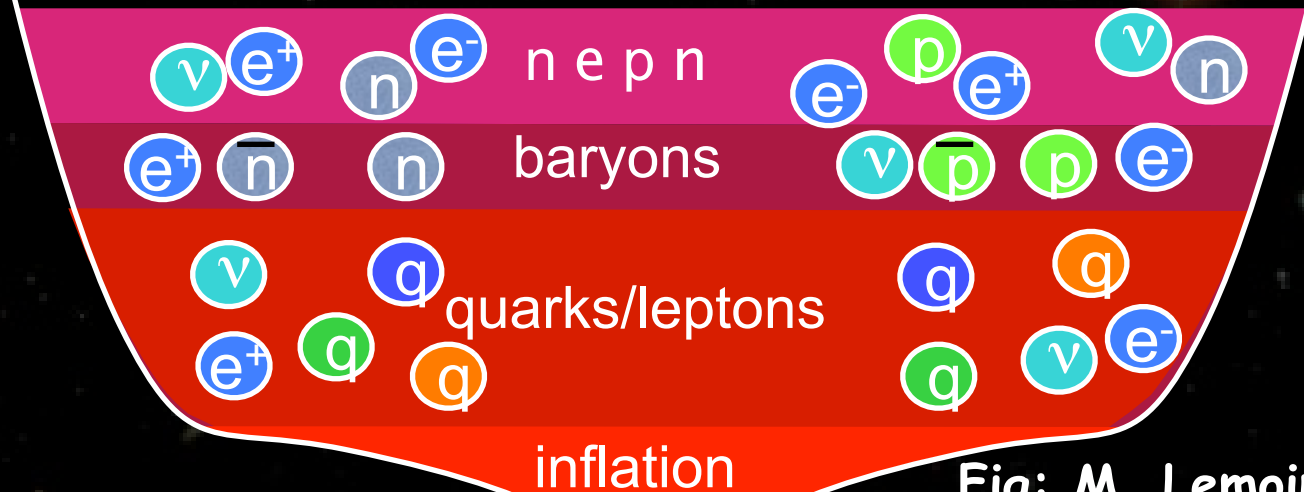
10^{-4} sec

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 (^2H) par fusion nucléaire
- ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
- ★ ^3H , ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^7Be , ^8Be

- 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 (^3H , ^7Be , ^8Be)

- 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)

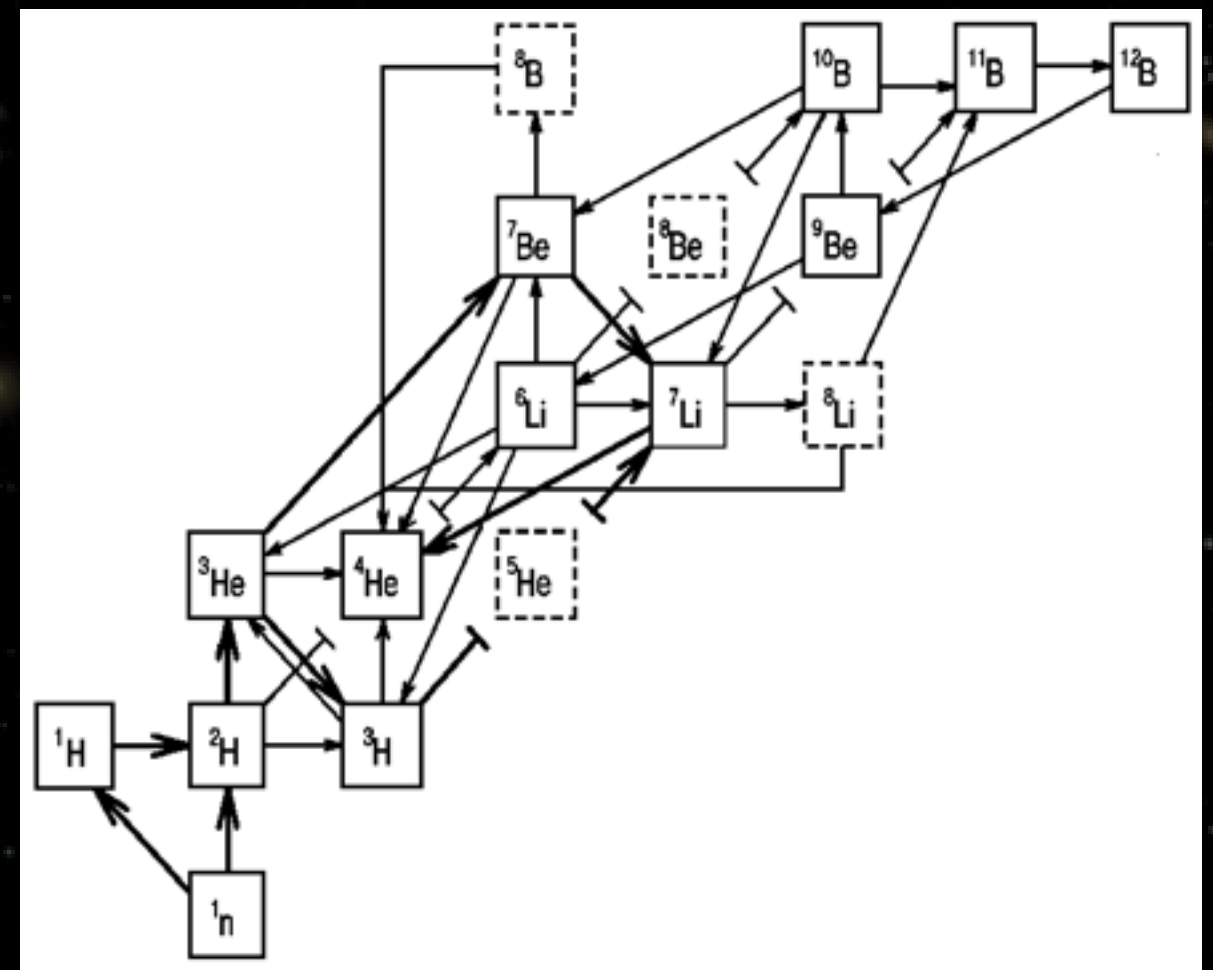
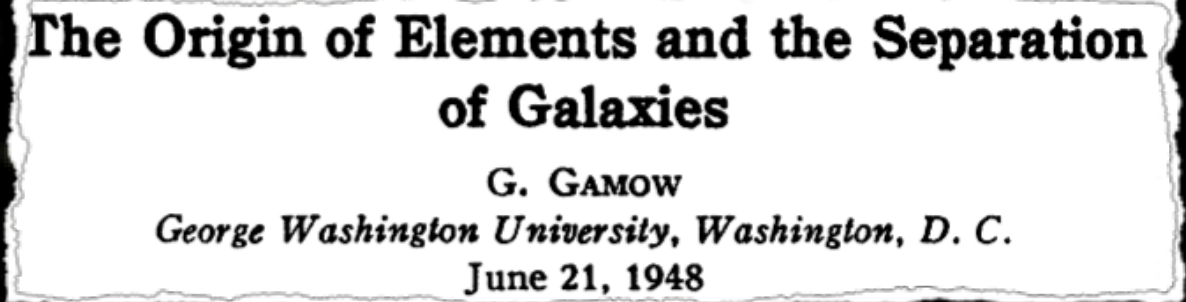
- **Début : ~ 3 min.**

- ★ 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 (^2H) par fusion nucléaire
- ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
- ★ ^3H , ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^7Be , ^8Be

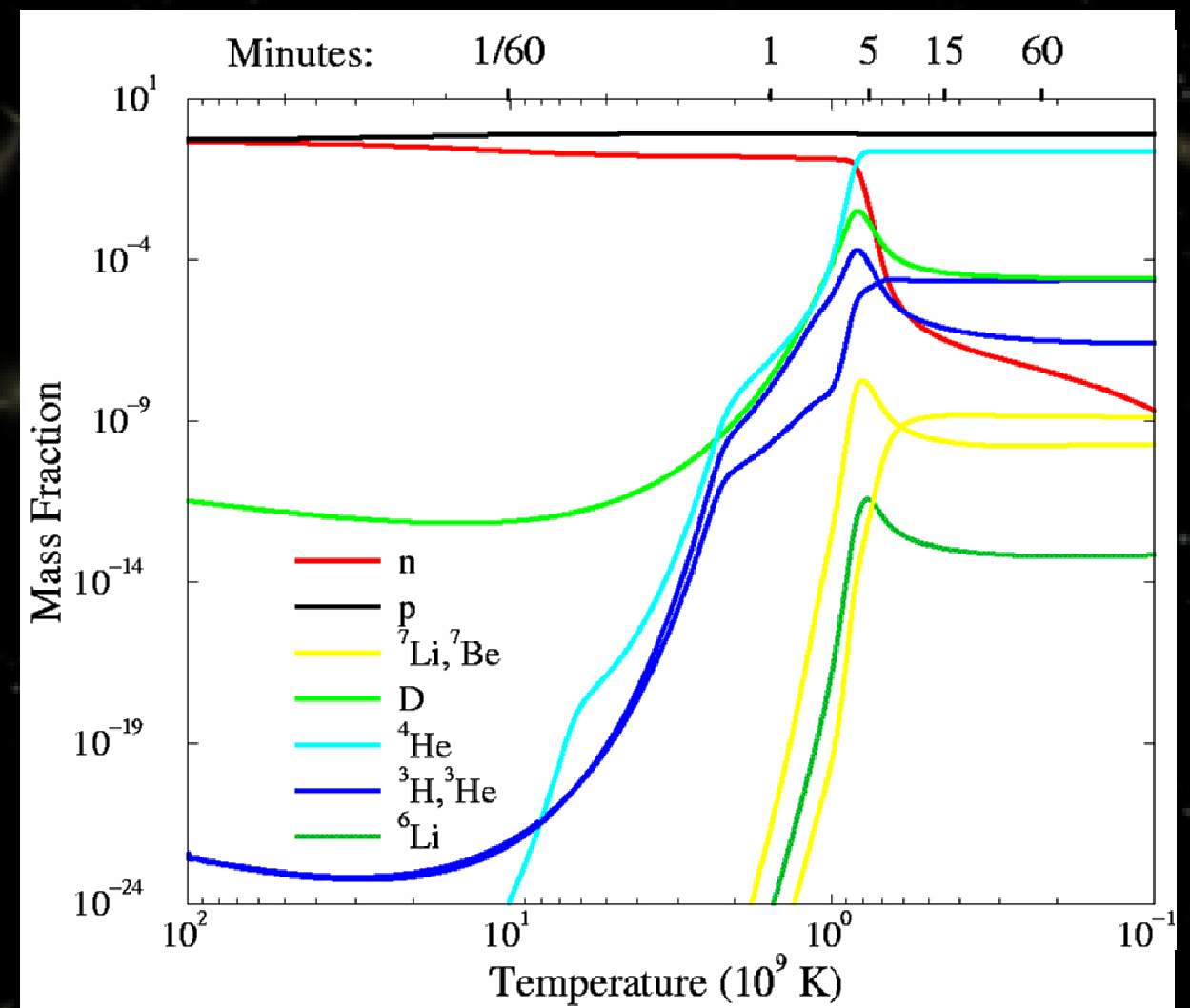
- Fin ~ 20 min.

- ★ 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 (^3H , ^7Be , ^8Be)

- Remarquable accord avec les observations

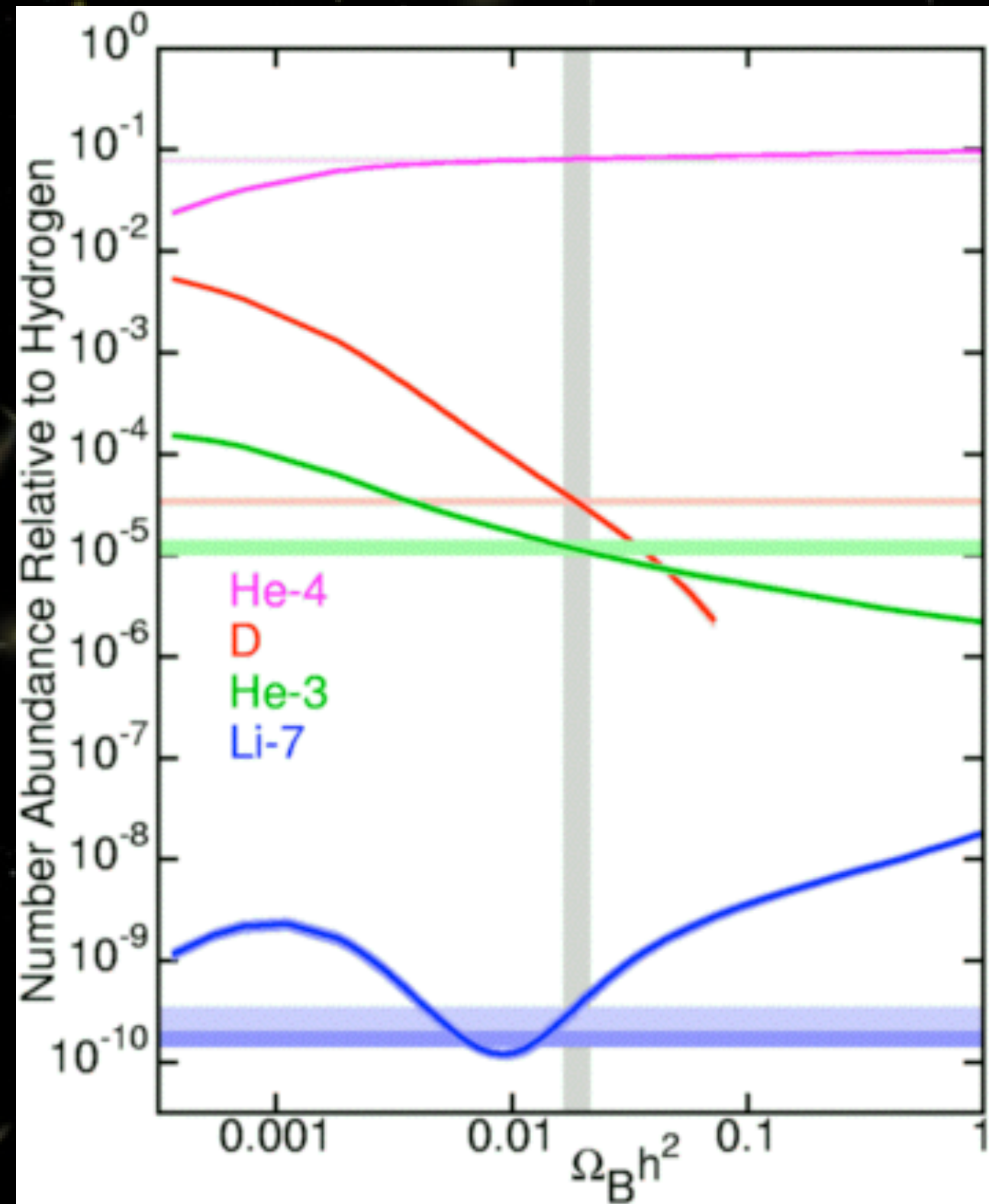
The Origin of Elements and the Separation of Galaxies

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 (^2H) par fusion nucléaire
 - ★ A partir du deuterium les éléments plus lourds se forment
 - ★ ^3H , ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^7Be , ^8Be
- **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 (^3H , ^7Be , ^8Be)
- **Remarquable accord avec les observations**



Nucléosynthèse primordiale (BBN)

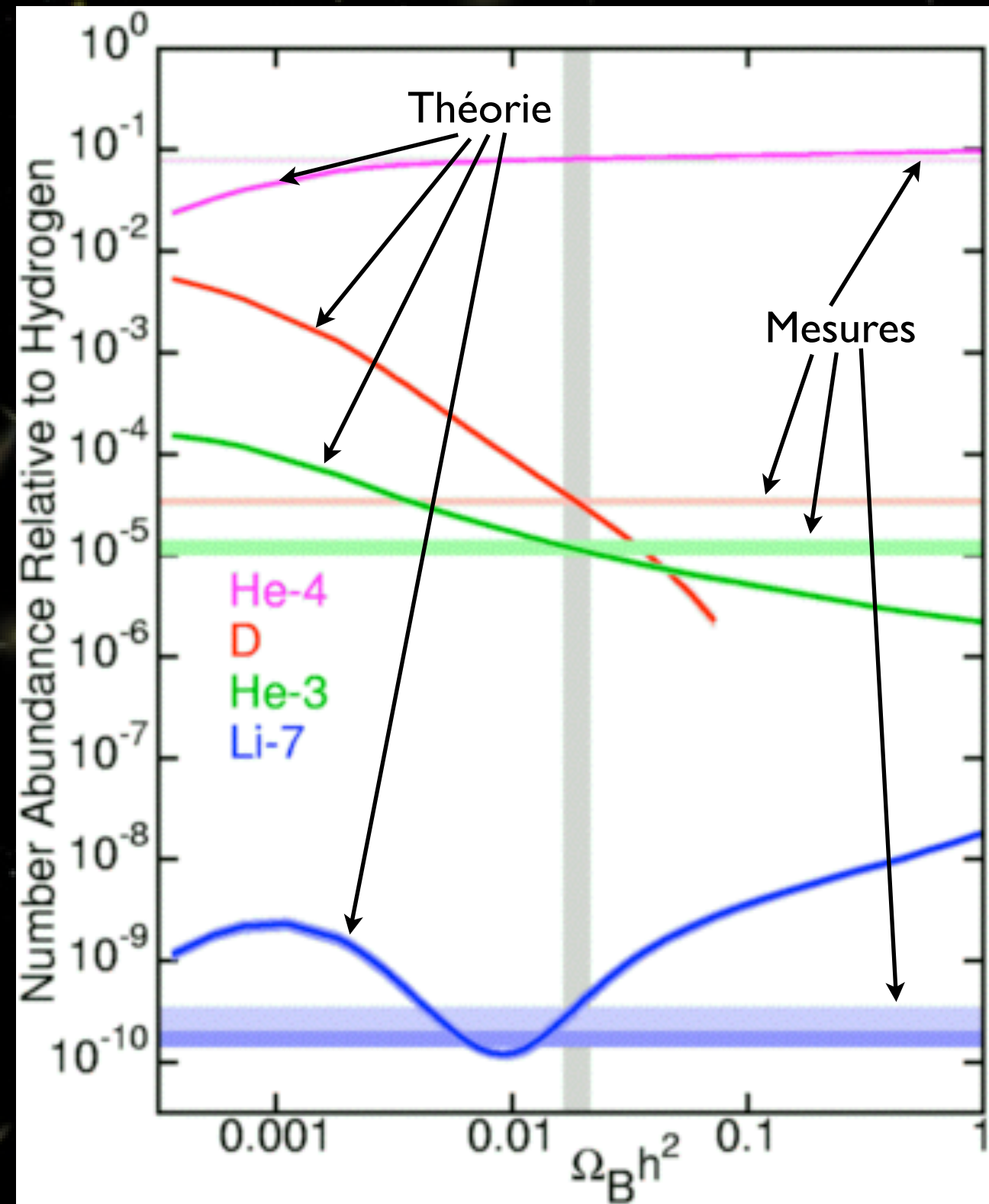
- Début : ~ 3 min.

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

- 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 (^3H , ^7Be , ^8Be)

- Remarquable accord avec les observations



Nucléosynthèse primordiale (BBN)

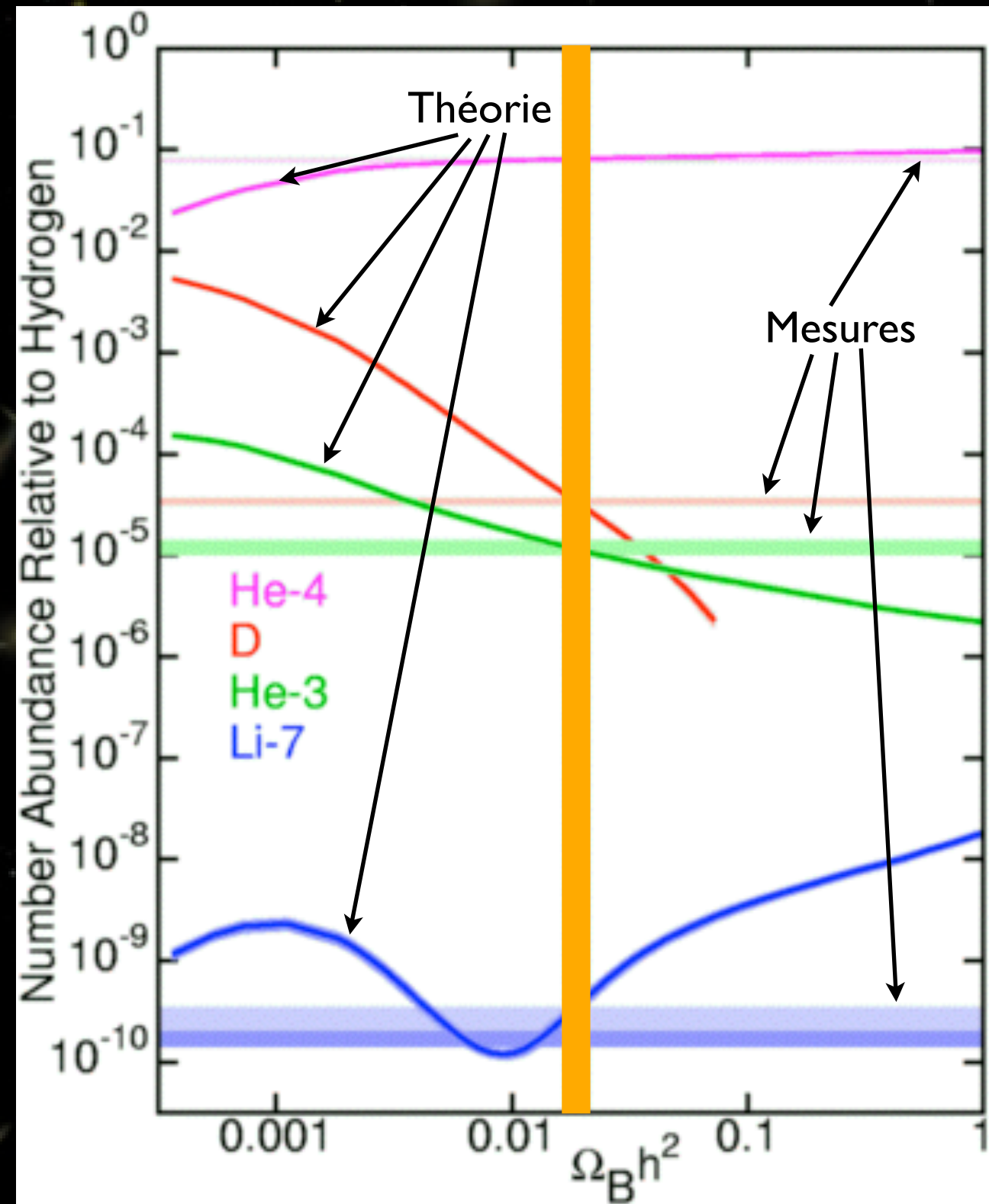
- Début : ~ 3 min.

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

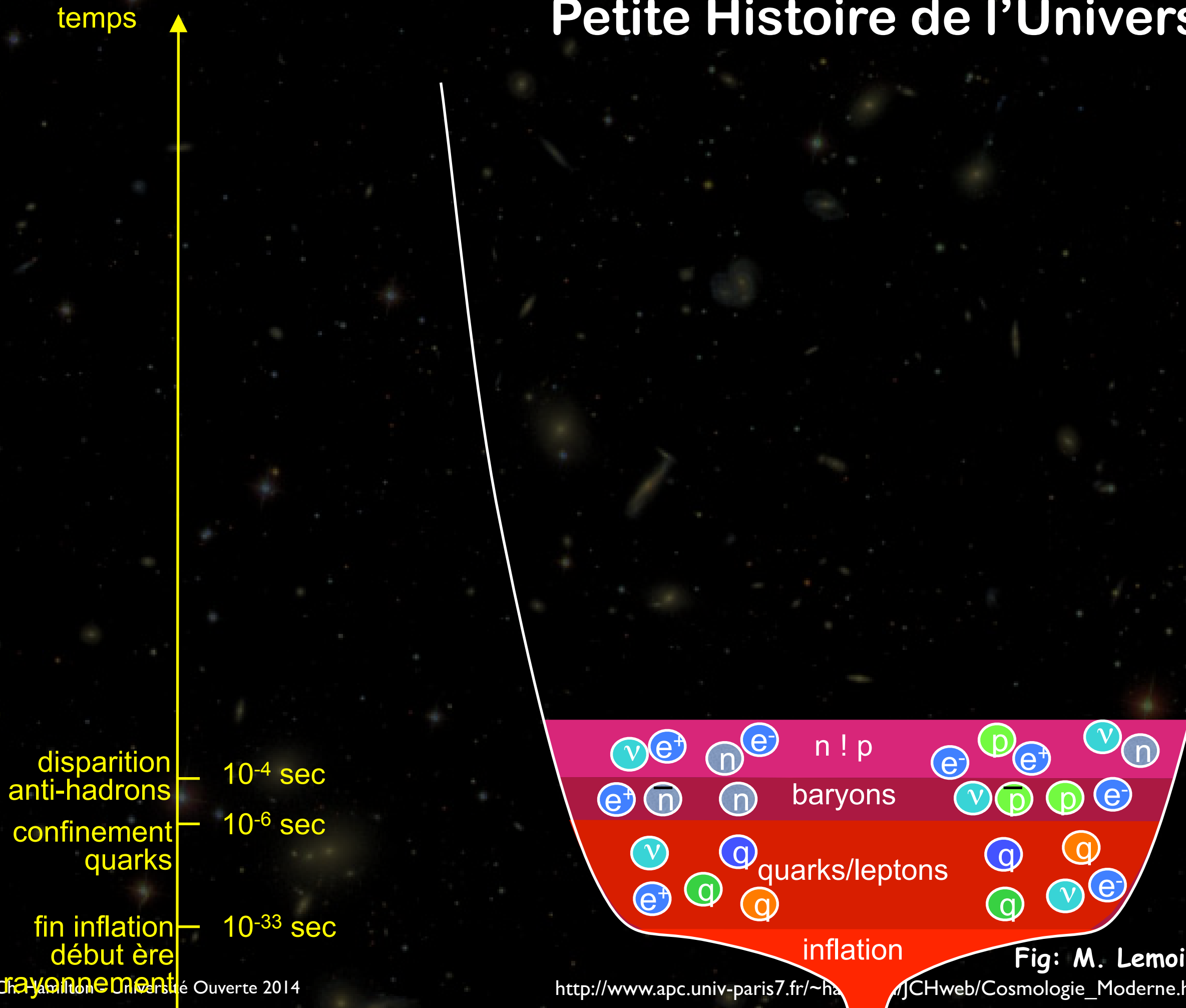
- Fin ~ 20 min.

- ★ 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 (^3H , ^7Be , ^8Be)

- Remarquable accord avec les observations

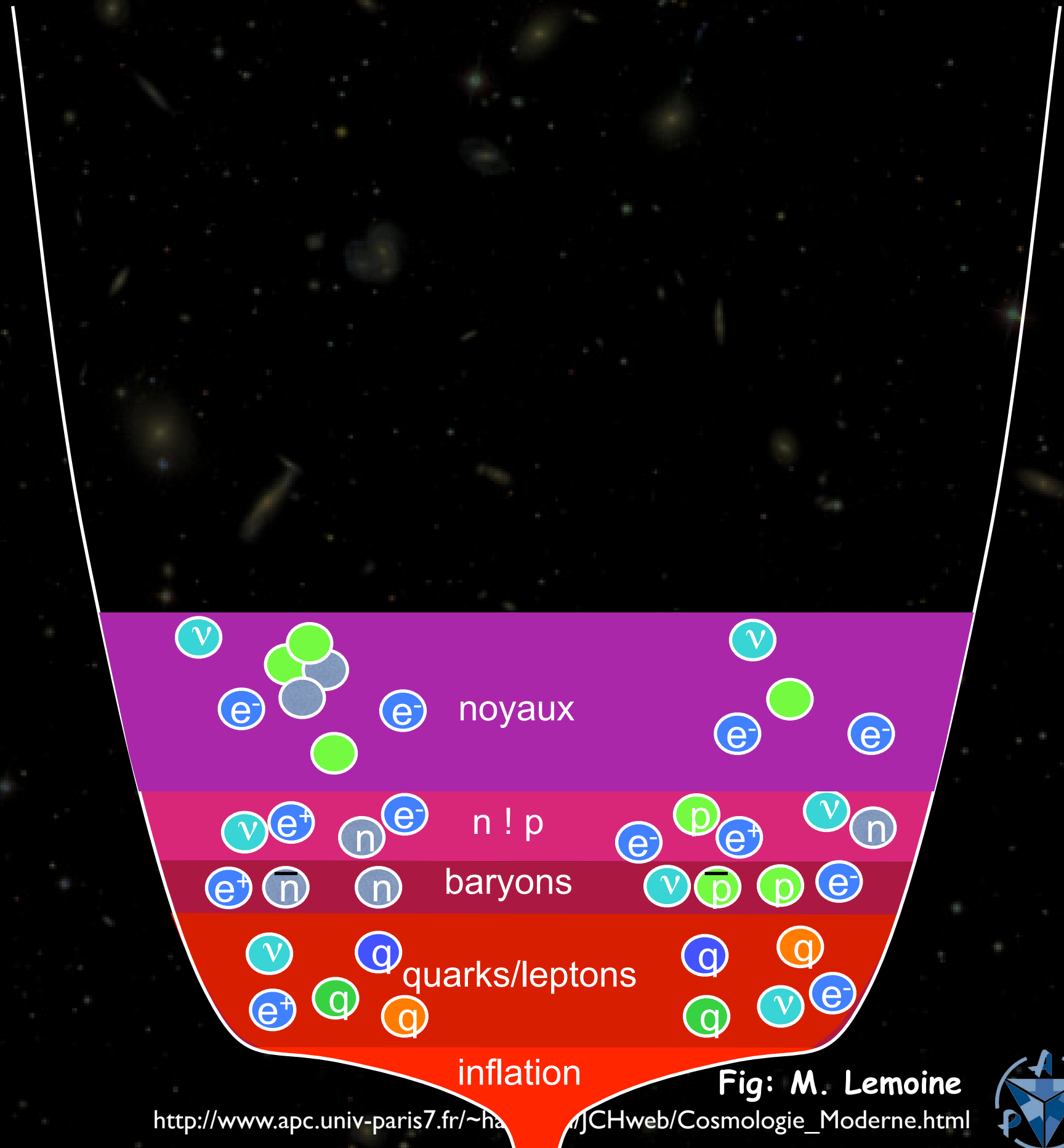


Petite Histoire de l'Univers



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



Petite Histoire de l'Univers

temps



égalité
matière —
rayonnement

10 000 ans

nucléosynthèse
primordiale

3 mn

disparition
anti-hadrons

10^{-4} sec

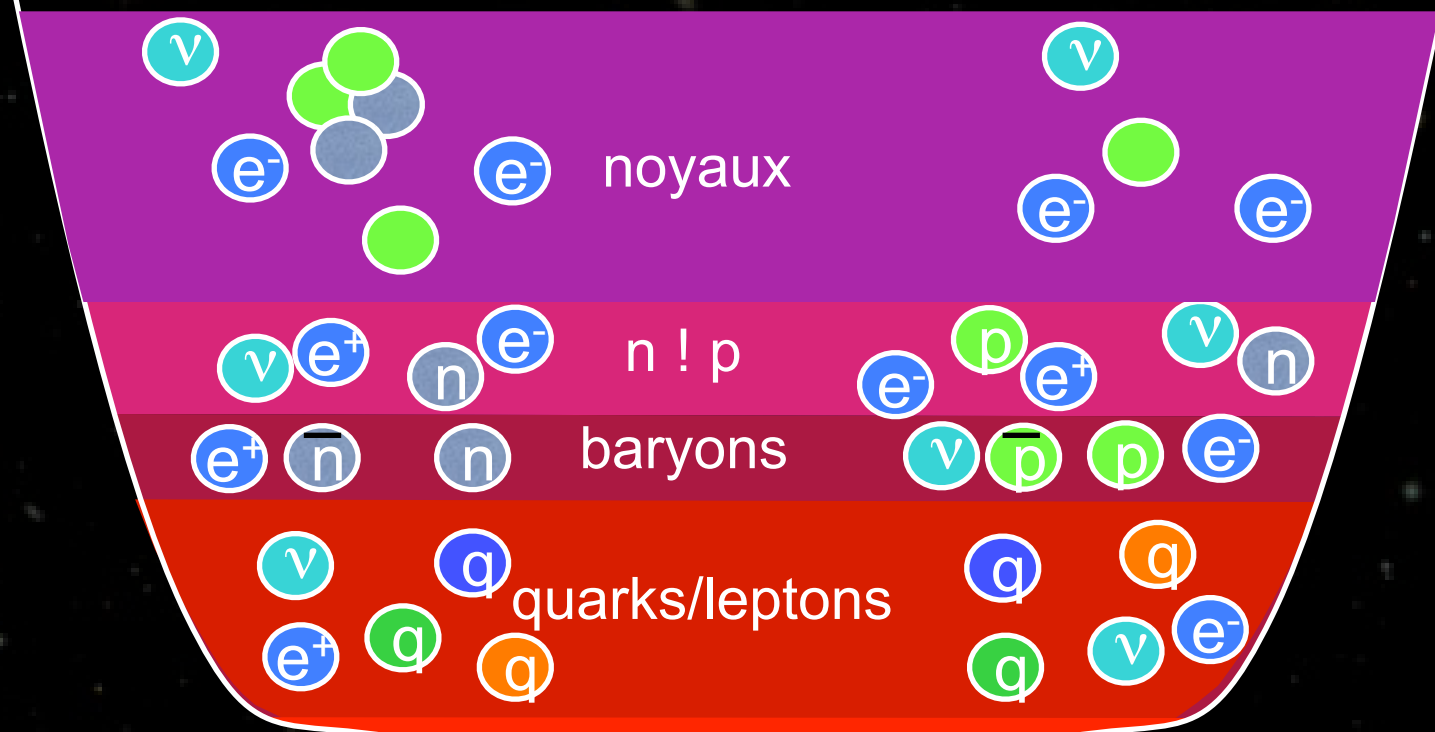
confinement
quarks

10^{-6} sec

fin inflation
début ère

10^{-33} sec

rayonnement



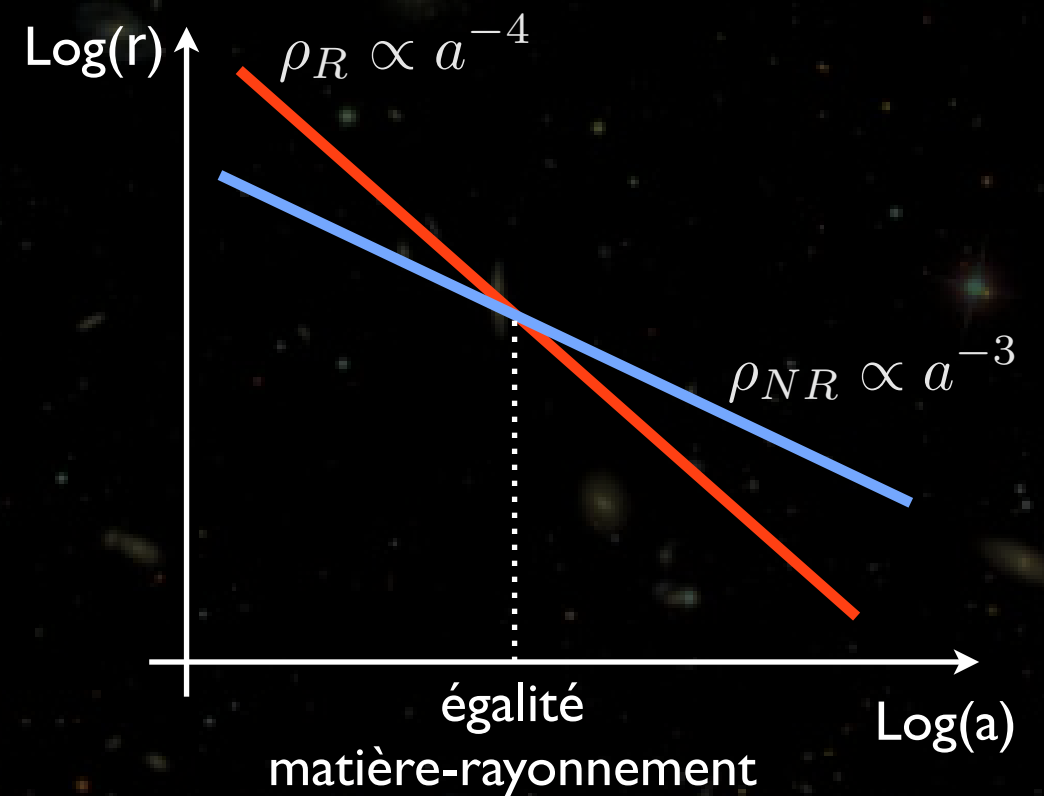
inflation

Fig: M. Lemoine



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: $\Omega_{R,0} \simeq 4.2h^{-2} \times 10^{-5}$

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

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

$$z_{eq} \simeq 3600$$

