

Évolution de l'Univers

le modèle standard de la cosmologie



Jean-Christophe Hamilton
APC

hamilton@apc.univ-paris7.fr

Plan du cours

● Cours II

★ L'Univers de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

- Métrique FLRW
- Redshift, taux d'expansion
- Équations de Friedman
- Densités des espèces composant l'Univers
- Expansion lors de diverses ères
- Quelques mots sur le «Big Bang» ...

★ F.A.Q. de cosmologie

★ Histoire «thermique» de l'Univers

- Transitions de phase
- Nucléosynthèse primordiale
- Égalité matière-rayonnement
- Découplage matière-rayonnement
- Pic acoustique des baryons
- Formation des structures
- Ré-ionisation
- premières étoiles, galaxies, supernovae ...



Métrie de FLRW

Relativité Générale

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

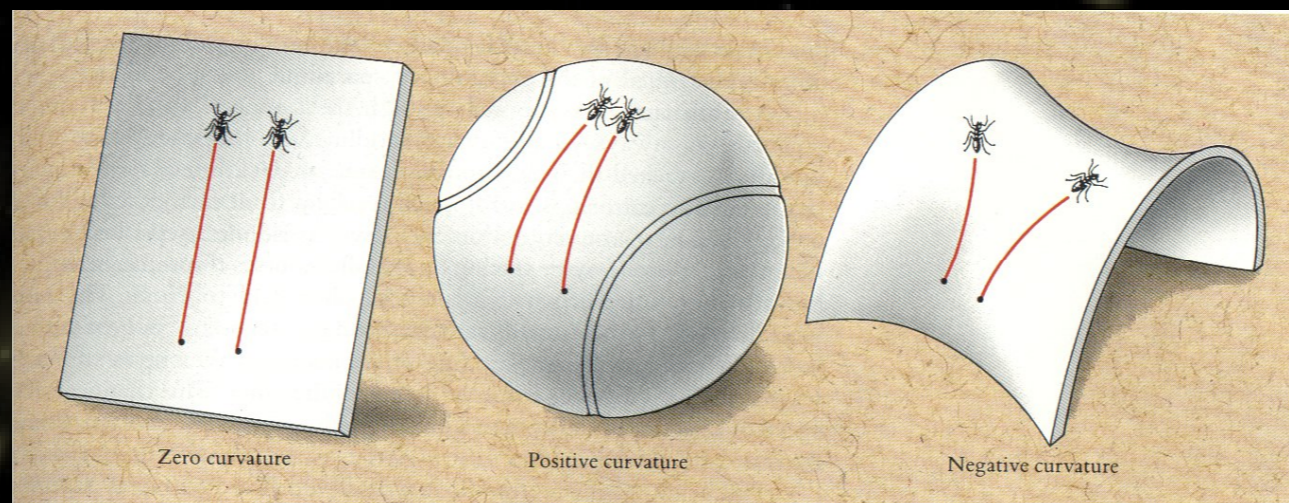
+ Expansion

+ Principe Cosmologique

= Métrie de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right] \quad k = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{Plat} \\ 1 & \rightarrow \text{Fermé} \\ -1 & \rightarrow \text{Ouvert} \end{cases}$$

$a(t)$: paramètre d'échelle



Plat ($k=0$)

Fermé ($k=1$)

Ouvert ($k=-1$)



Equations de Friedman

- On écrit les équations d'Einstein pour la métrique FLRW
→ Équations de Friedman:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \end{array} \right.$$



Equations de Friedman

- On écrit les équations d'Einstein pour la métrique FLRW
→ Équations de Friedman:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \end{array} \right.$$

Courbure



Equations de Friedman

- On écrit les équations d'Einstein pour la métrique FLRW
→ Équations de Friedman:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \end{array} \right.$$

Courbure

Énergie sombre



Equations de Friedman

- On écrit les équations d'Einstein pour la métrique FLRW
 → Équations de Friedman:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \end{array} \right.$$

← Courbure
← Énergie sombre
←

Pression et densité $\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$ (conservation du tenseur Énergie-Impulsion)
 Équation d'état $p = w\rho$



Equations de Friedman

- On écrit les équations d'Einstein pour la métrique FLRW
 → Équations de Friedman:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \end{array} \right.$$

← Courbure
← Énergie sombre

← ρ et $3p$
 Pression et densité $\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$ Équation d'état $p = w\rho$
 (conservation du tenseur Énergie-Impulsion)

- Taux d'expansion (paramètre de Hubble):

$$\frac{\dot{a}}{a} = H(z) \quad \text{avec le redshift} \quad 1 + z = \frac{a_0}{a}$$



Géométrie et contenu de l'Univers

► Densité critique: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$

$$\begin{aligned} H^2 &= \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2 \left(\frac{\rho}{\rho_c} + \frac{k}{a^2 H^2} + \frac{\Lambda}{3H^2} \right) \\ &= H^2 (\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda) \end{aligned}$$

► Densités des espèces dans l'Univers

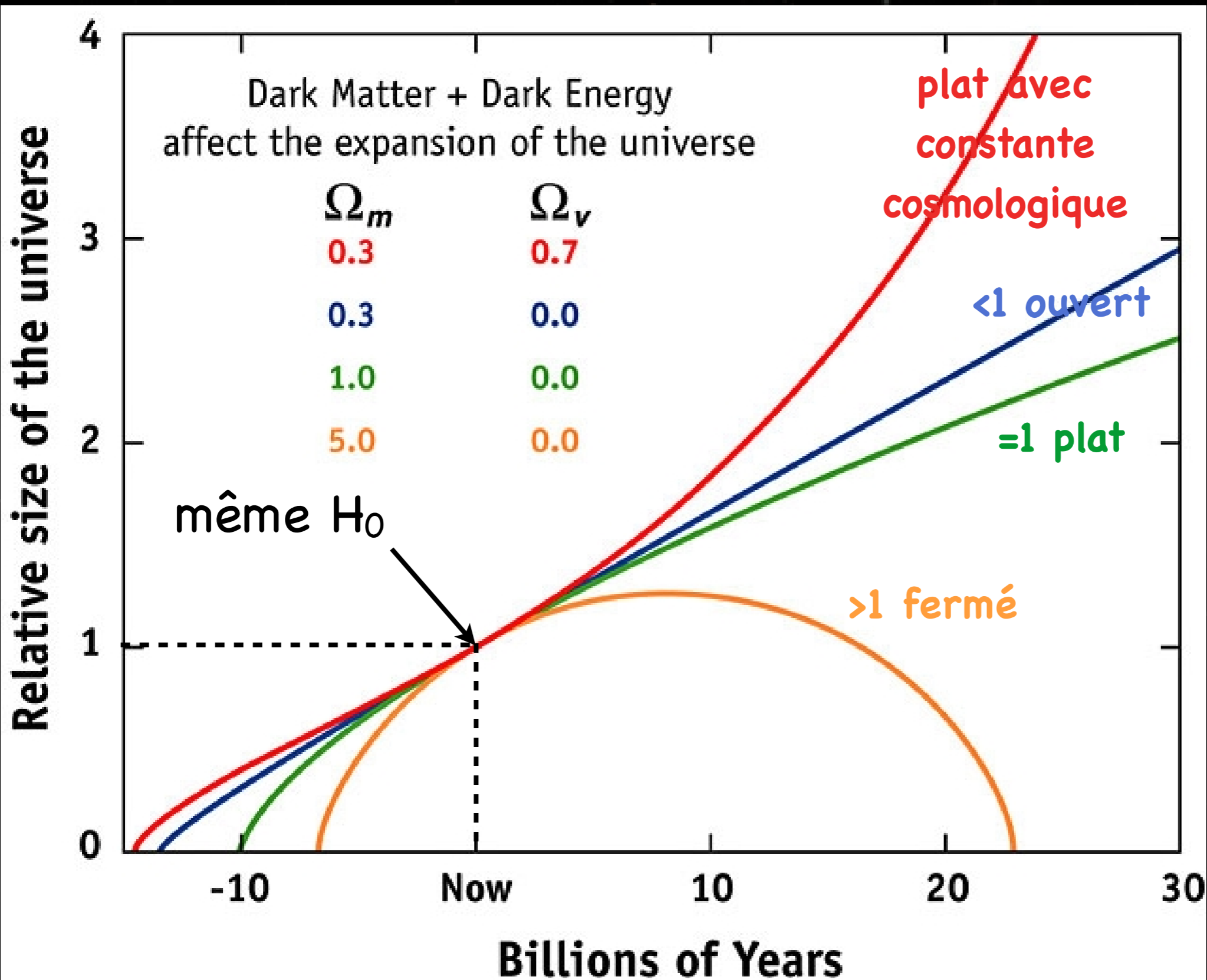
$$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_c}, \quad \Omega_k = \frac{k}{a^2 H^2}, \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2}$$

→ On a toujours: $\Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$

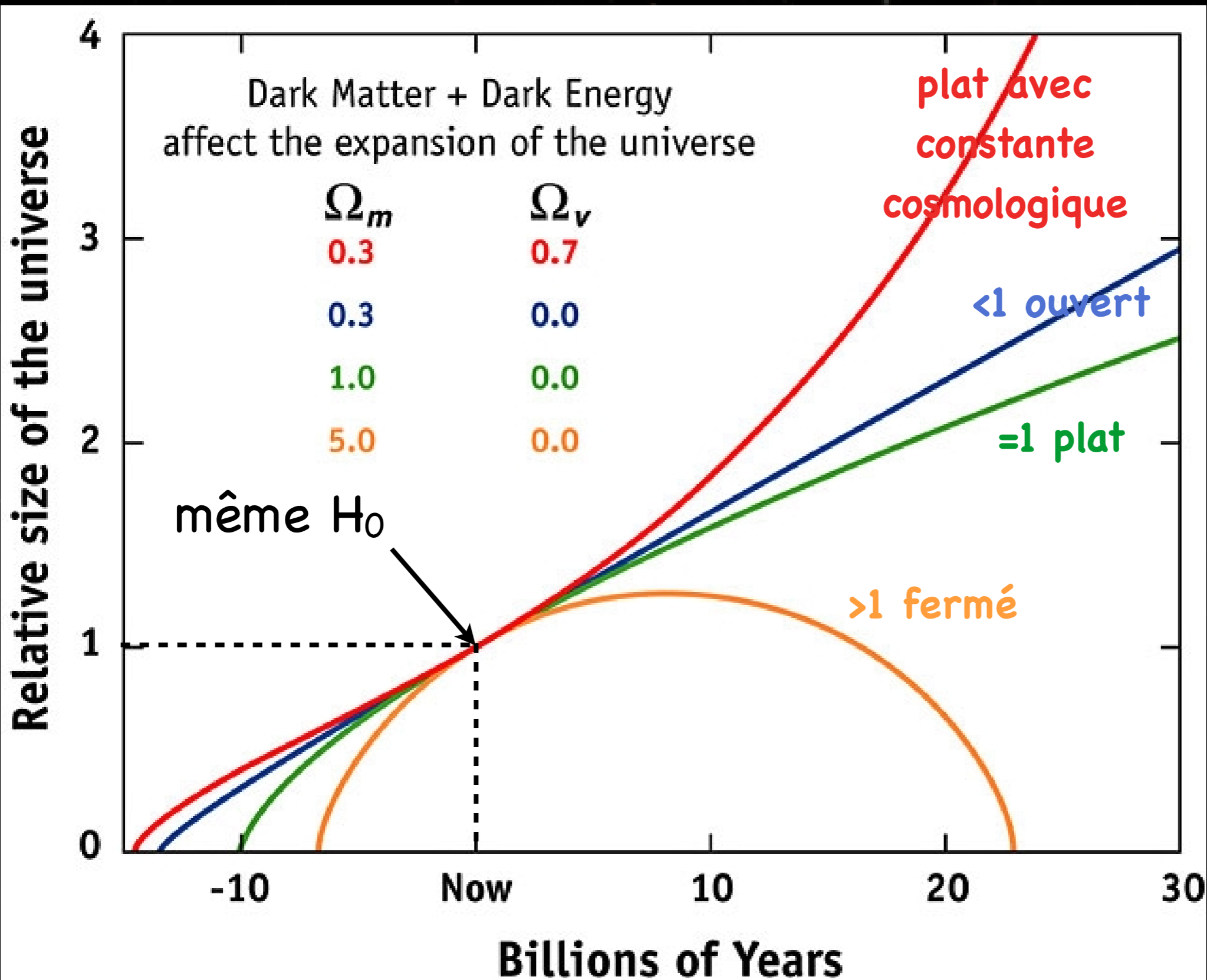
En particulier, pour un Univers plat: $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$



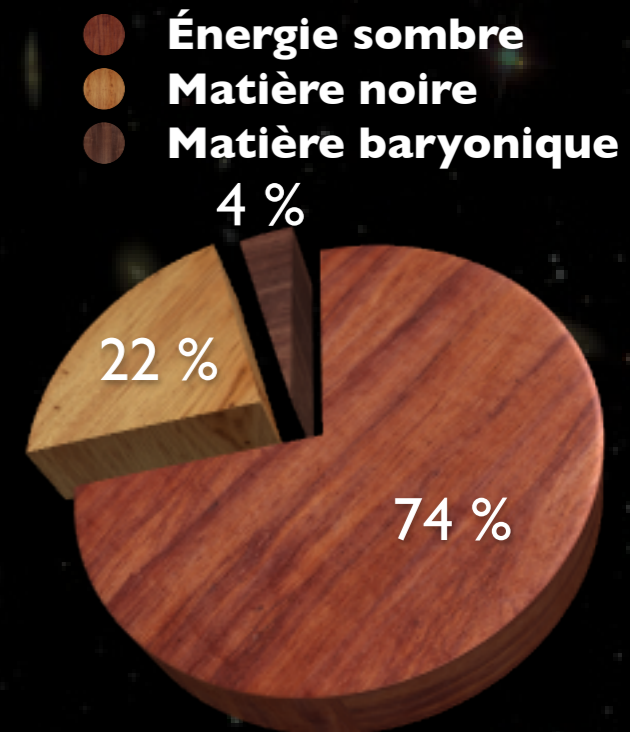
Facteur d'échelle en FLRW



Facteur d'échelle en FLRW



Mesures actuelles



Solution simples des équations de Friedman

- Univers primordial : domination du rayonnement

- ★ équation d'état de la matière relativiste : $p = \frac{1}{3}\rho$

- ★ Conservation du tenseur énergie-impulsion : $\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$

$$\Leftrightarrow \dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a} \times \frac{4}{3}\rho = 0$$

$$\Leftrightarrow \dot{\rho} + 4\rho\frac{\dot{a}}{a} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{\rho}}{\rho} = -4\frac{\dot{a}}{a}$$

$$\Leftrightarrow \log \rho = \log(a^{-4}) + \text{Cte}$$

$$\Leftrightarrow \rho \propto a^{-4}$$

$$\implies \Omega_R = \Omega_R^0 (1+z)^4$$

- ★ Première équation de Friedman : $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \propto a^{-4}$$

$$\Leftrightarrow \dot{a} \propto a^{-1}$$

$$\Leftrightarrow a \propto t^{1/2}$$



● Domination de la matière:

- ★ La pression est alors négligeable devant la densité
- ★ Conservation du tenseur énergie impulsion: $\dot{\rho} + 3\rho\frac{\dot{a}}{a} = 0$

$$\begin{array}{c} \vdots \\ \Leftrightarrow \rho \propto a^{-3} \quad \Longrightarrow \Omega_{\text{NR}} = \Omega_{\text{NR}}^0 (1+z)^3 \end{array}$$

- ★ Première équation de Friedman $\Longrightarrow a \propto t^{2/3}$

● Domination par la constante cosmologique Λ :

- ★ Densité constante.
- ★ La conservation du tenseur énergie impulsion: $\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$

- ★ donc l'équation d'état est : $p = -\rho$
- ★ Première équation de Friedman $\Longrightarrow \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3}$

$$\Longrightarrow a \propto \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}}t\right) \quad (\text{expansion accélérée})$$

- ★ Cela semble être notre situation actuelle !



Quid du Big Bang ?

- Pas grand chose ...
 - ★ La relativité Générale n'est pas une théorie quantique de l'espace-temps (elle est dite «classique»)
- La mécanique quantique donne une échelle en dessous de laquelle les effets quantiques devraient se faire sentir :

Temps de Planck $t_{P1} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5.4 \times 10^{-44} \text{ s}$

- On n'a pas de théorie valide pour décrire ce qui s'est passé avant ...
 - ★ Espoirs :
 - Théorie des cordes
 - Gravité quantique à boucles
 - ...



La gravité quantique ...

Extrait de la série TV «The Big Bang Theory»



La gravité quantique ...



Extrait de la série TV «The Big Bang Theory»



Plan du cours

● Cours II

★ L'Univers de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

- Métrique FLRW
- Redshift, taux d'expansion
- Équations de Friedman
- Densités des espèces composant l'Univers
- Expansion lors de diverses ères
- Quelques mots sur le «Big Bang» ...

★ F.A.Q. de cosmologie

★ Histoire «thermique» de l'Univers

- Transitions de phase
- Nucléosynthèse primordiale
- Égalité matière-rayonnement
- Découplage matière-rayonnement
- Pic acoustique des baryons
- Formation des structures
- Ré-ionisation
- premières étoiles, galaxies, supernovae ...



Cosmo F.A.Q.



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?
 - ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps.
C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
 - ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?

- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps.
C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?
 - ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
 - ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...
- Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?

- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin

- Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?

- ★ Oui.
- ★ Les mesures actuelles favorisent un Univers plat, donc infini.
- ★ Sauf s'il est multiples connexe. Les contraintes à ce jour sont telles que la taille de la cellule (si elle existe) est grande par rapport à l'Univers observable.
- ★ L'image du Big Bang comme une explosion à partir d'un point est fausse.



Cosmo F.A.Q.

- **Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?**

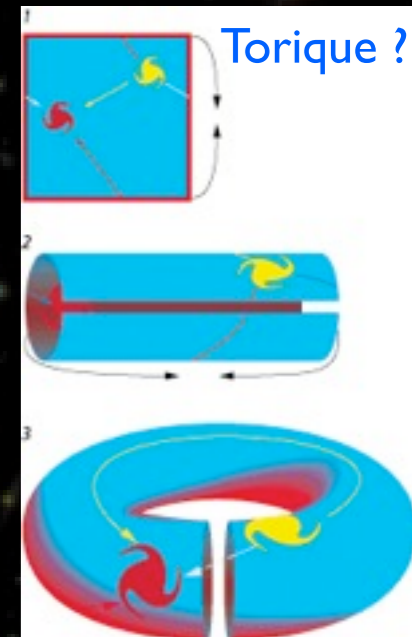
- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin

- **Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?**

- ★ Oui.
- ★ Les mesures actuelles favorisent un Univers plat, donc infini.
- ★ Sauf s'il est multiples connexe. Les contraintes à ce jour sont telles que la taille de la cellule (si elle existe) est grande par rapport à l'Univers observable.
- ★ L'image du Big Bang comme une explosion à partir d'un point est fausse.



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?

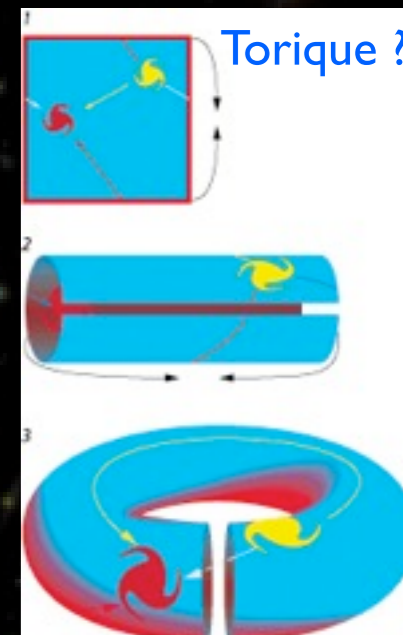
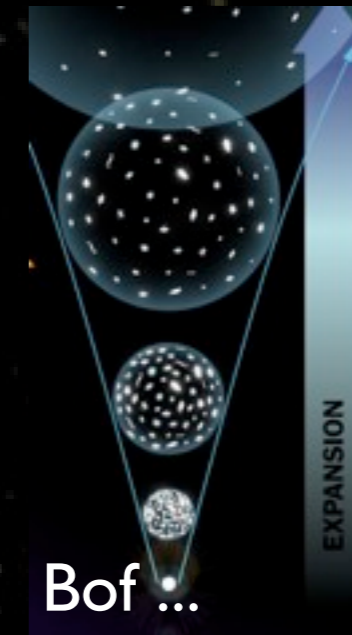
- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin

- Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?

- ★ Oui.
- ★ Les mesures actuelles favorisent un Univers plat, donc infini.
- ★ Sauf s'il est multiplement connexe. Les contraintes à ce jour sont telles que la taille de la cellule (si elle existe) est grande par rapport à l'Univers observable.
- ★ L'image du Big Bang comme une explosion à partir d'un point est fautive.



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?

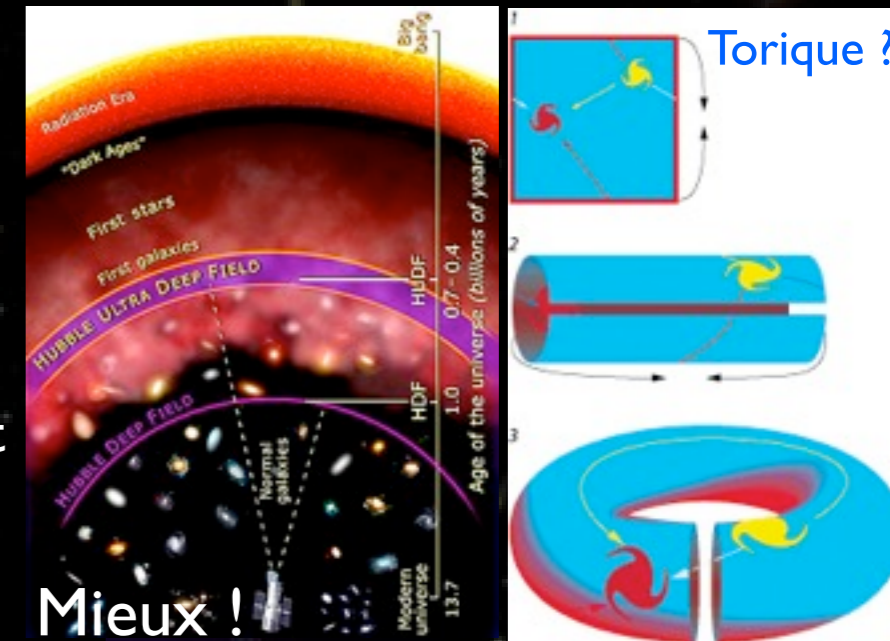
- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin

- Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?

- ★ Oui.
- ★ Les mesures actuelles favorisent un Univers plat, donc infini.
- ★ Sauf s'il est multiplement connexe. Les contraintes à ce jour sont telles que la taille de la cellule (si elle existe) est grande par rapport à l'Univers observable.
- ★ L'image du Big Bang comme une explosion à partir d'un point est fausse.



Cosmo F.A.Q.

- Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?

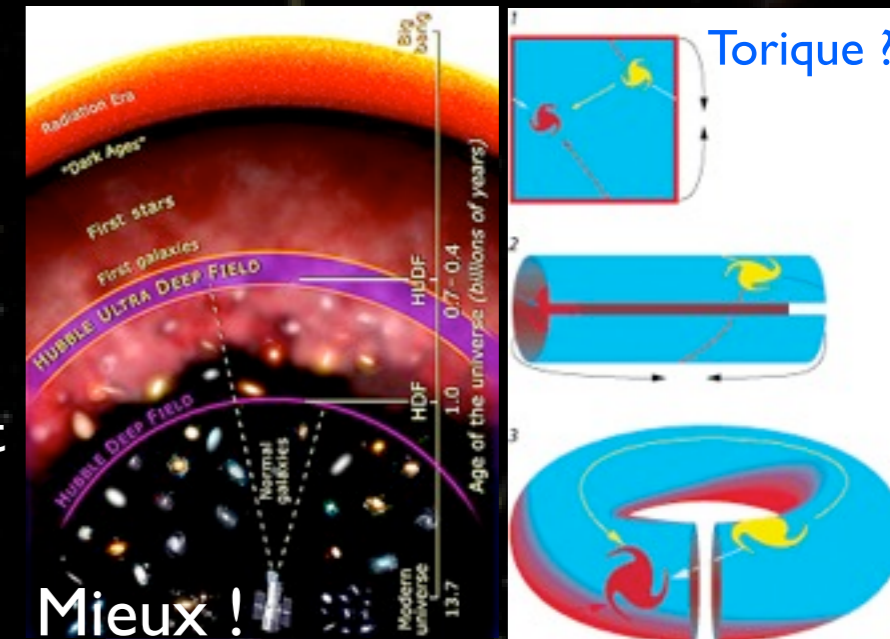
- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin

- Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?

- ★ Oui.
- ★ Les mesures actuelles favorisent un Univers plat, donc infini.
- ★ Sauf s'il est multiplement connexe. Les contraintes à ce jour sont telles que la taille de la cellule (si elle existe) est grande par rapport à l'Univers observable.
- ★ L'image du Big Bang comme une explosion à partir d'un point est fausse.



- L'expansion se fait-elle dans quelque chose ?



Cosmo F.A.Q.

● Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?

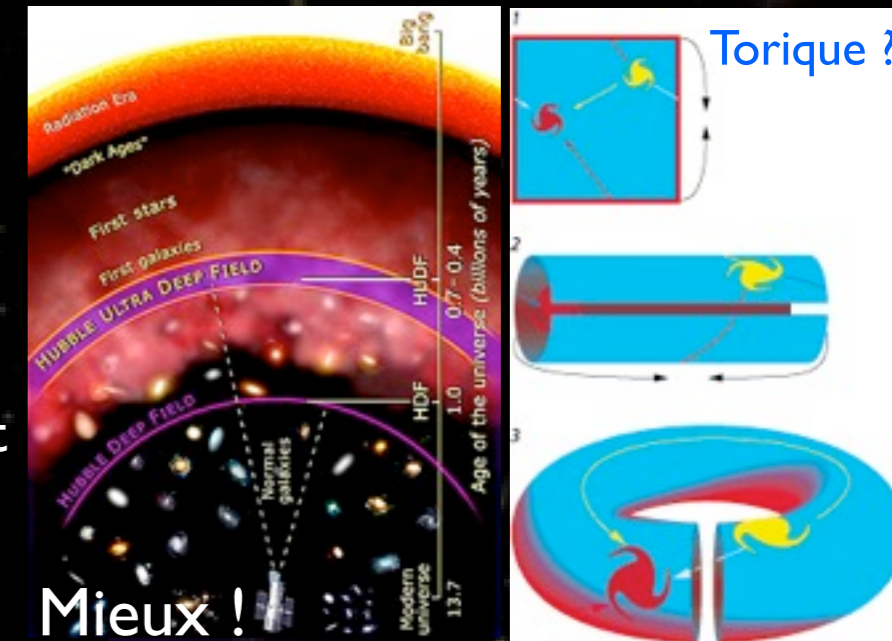
- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin

● Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?

- ★ Oui.
- ★ Les mesures actuelles favorisent un Univers plat, donc infini.
- ★ Sauf s'il est multiplement connexe. Les contraintes à ce jour sont telles que la taille de la cellule (si elle existe) est grande par rapport à l'Univers observable.
- ★ L'image du Big Bang comme une explosion à partir d'un point est fausse.



● L'expansion se fait-elle dans quelque chose ?

- ★ Non. L'Univers est tout par définition. Il n'y a pas d'expansion «dans» quelque chose.
- ★ Dans l'image du ballon qui se gonfle, on vit «à la surface du ballon» donc sur 2 dimensions. La troisième dimension n'a pas lieu d'être.
- ★ Notre esprit plonge une sphère dans 3 dimensions et voit une boule, mais la surface de la sphère est à 2 dimensions.



Cosmo F.A.Q.

● Qu'y avait-il avant le Big-Bang ?

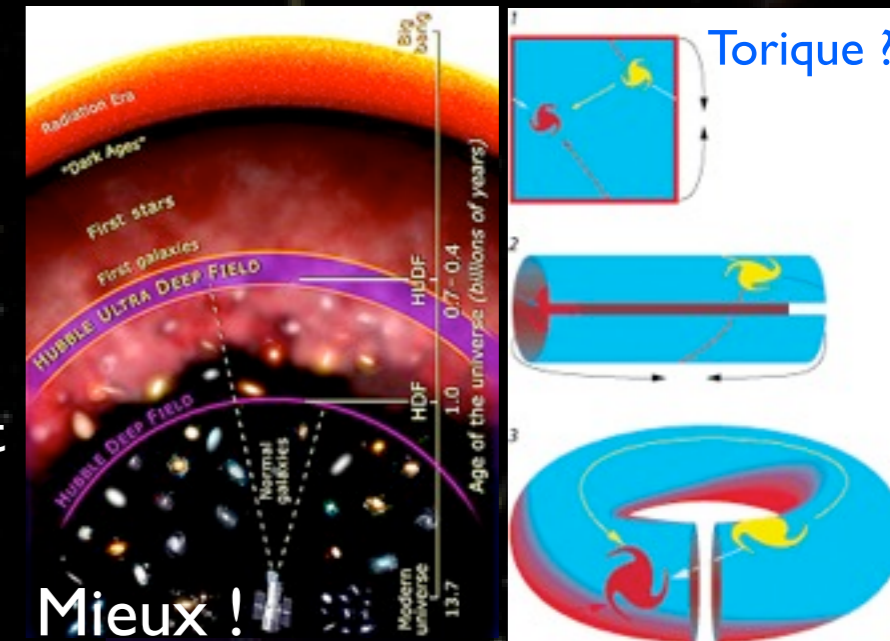
- ★ Mauvaise question : il n'y a pas d'avant l'apparition du temps. C'est comme se demander ce qui est au Nord du pôle Nord.
- ★ Comment sont apparus l'espace et le temps ? Cf. Saint Augustin ...

"Je réponds à cette demande : Que faisait Dieu avant de créer le ciel et la terre ? Je réponds, non comme celui qui éluda, dit-on, les assauts d'une telle question par cette plaisanterie : Dieu préparait des supplices aux sondeurs de mystères. Rire n'est pas répondre. Et je ne réponds pas ainsi. Et j'aimerais mieux confesser mon ignorance, que d'appeler la raillerie sur une demande profonde, et l'éloge sur une réponse ridicule.

Les confessions - Saint Augustin

● Si l'Univers est plat ou ouvert, il est infini spatialement. L'a-t-il toujours été ?

- ★ Oui.
- ★ Les mesures actuelles favorisent un Univers plat, donc infini.
- ★ Sauf s'il est multiplement connexe. Les contraintes à ce jour sont telles que la taille de la cellule (si elle existe) est grande par rapport à l'Univers observable.
- ★ L'image du Big Bang comme une explosion à partir d'un point est fausse.



● L'expansion se fait-elle dans quelque chose ?

- ★ Non. L'Univers est tout par définition. Il n'y a pas d'expansion «dans» quelque chose.
- ★ Dans l'image du ballon qui se gonfle, on vit «à la surface du ballon» donc sur 2 dimensions. La troisième dimension n'a pas lieu d'être.
- ★ Notre esprit plonge une sphère dans 3 dimensions et voit une boule, mais la surface de la sphère est à 2 dimensions.



Plan du cours

● Cours II

★ L'Univers de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

- Métrique FLRW
- Redshift, taux d'expansion
- Équations de Friedman
- Densités des espèces composant l'Univers
- Expansion lors de diverses ères
- Quelques mots sur le «Big Bang» ...

★ F.A.Q. de cosmologie

★ Histoire «thermique» de l'Univers

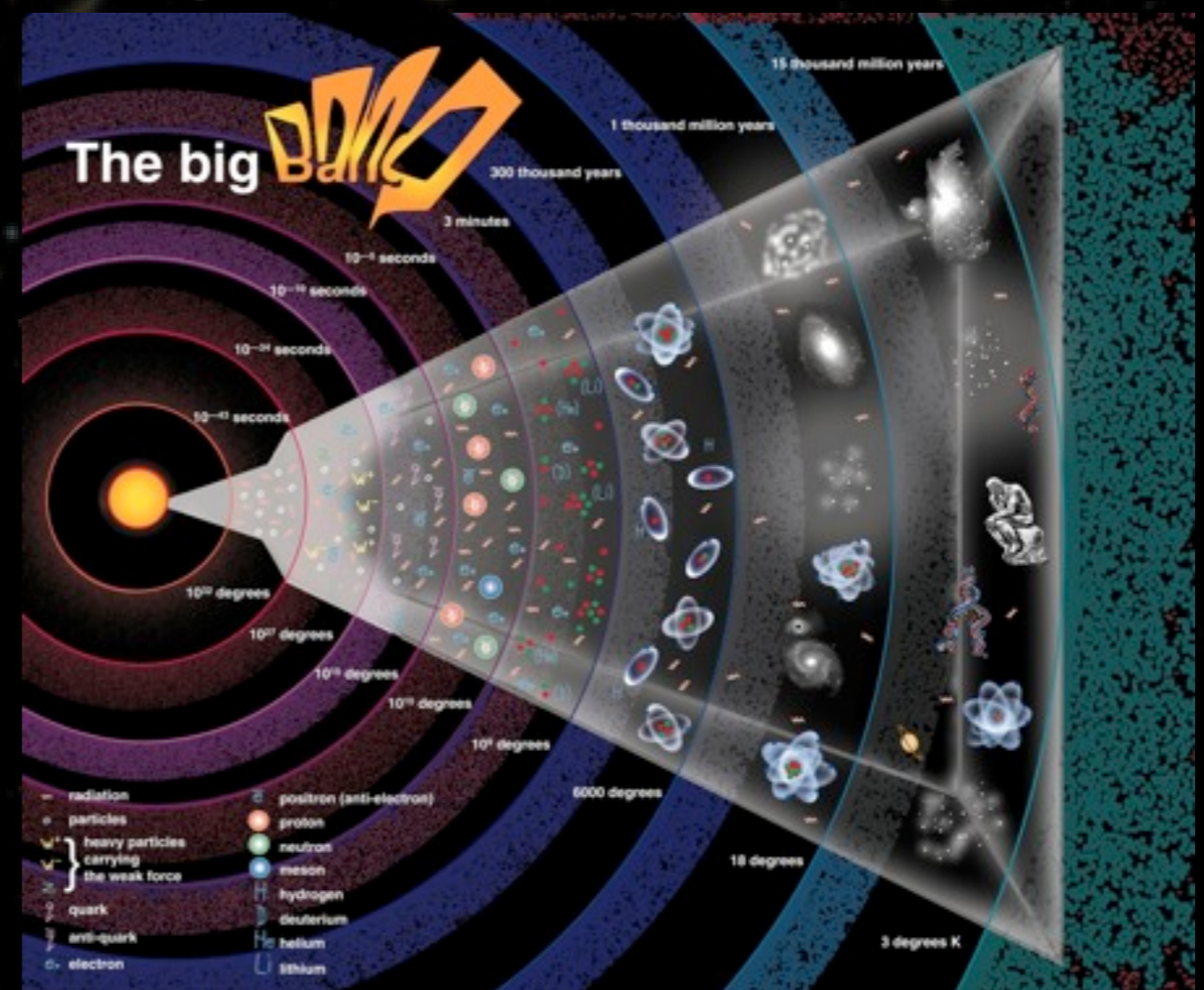
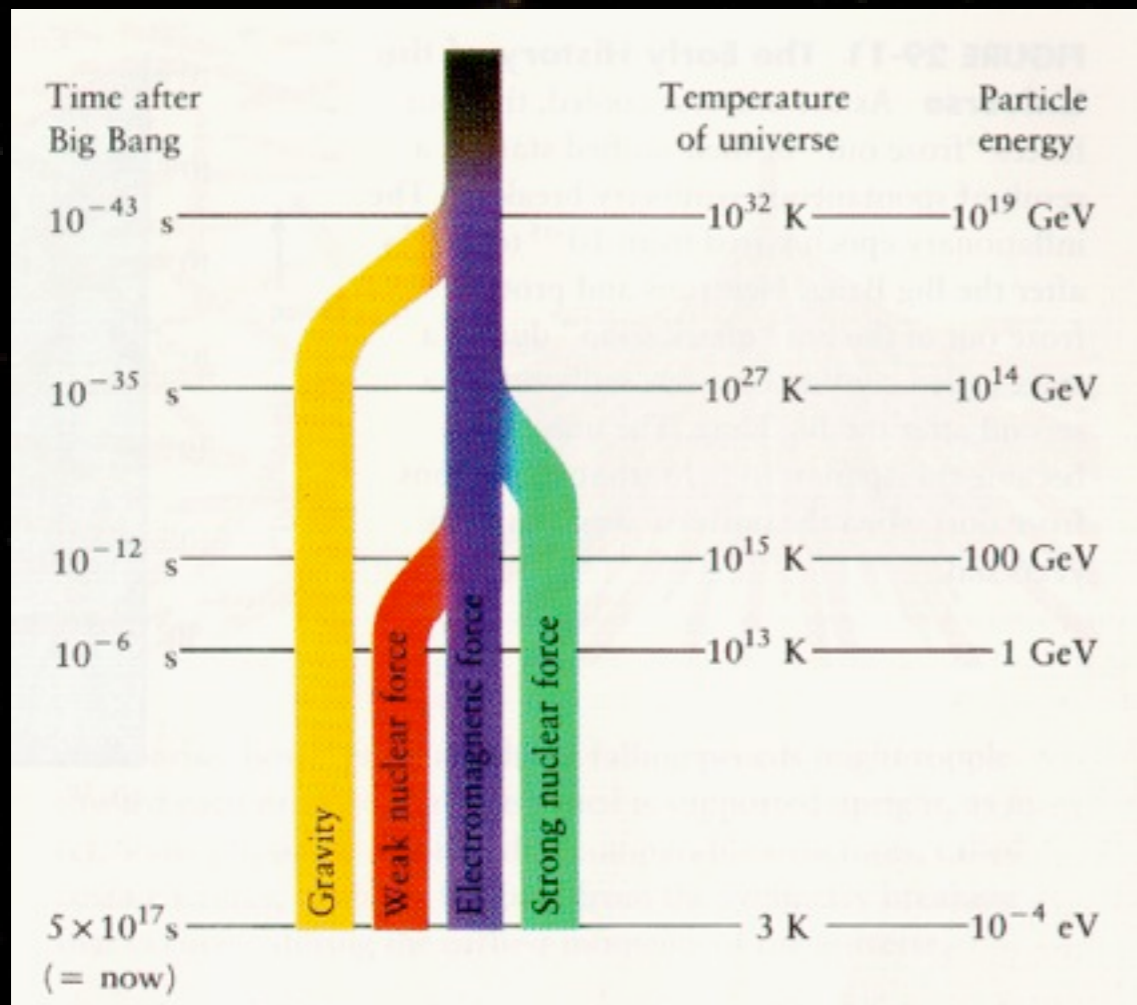
- Transitions de phase
- Nucléosynthèse primordiale
- Égalité matière-rayonnement
- Découplage matière-rayonnement
- Pic acoustique des baryons
- Formation des structures
- Ré-ionisation
- premières étoiles, galaxies, supernovae ...

★ Matière noire



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)



Petite Histoire de l'Univers

temps

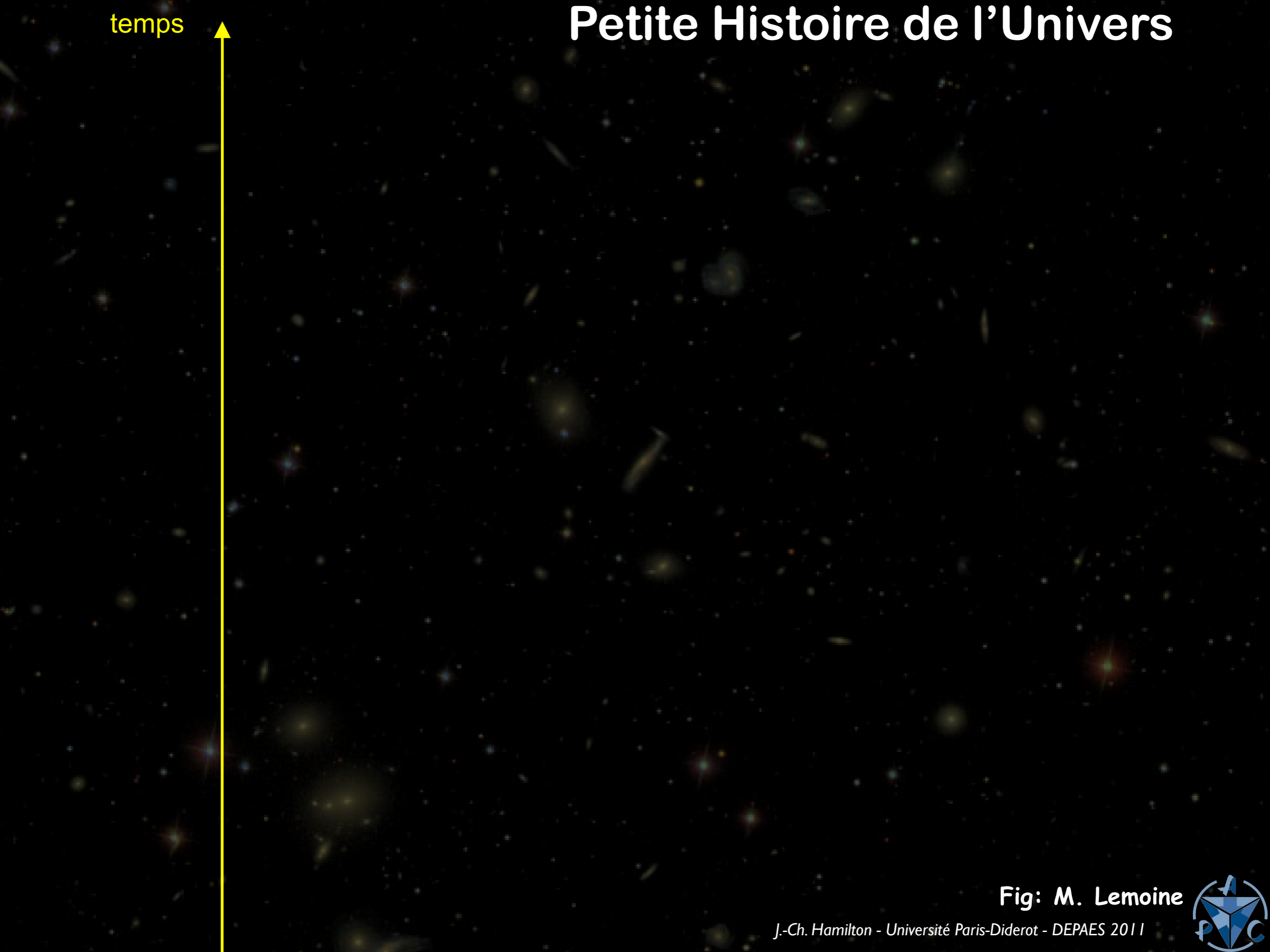


Fig: M. Lemoine

J.-Ch. Hamilton - Université Paris-Diderot - DEPAES 2011



Petite Histoire de l'Univers

temps

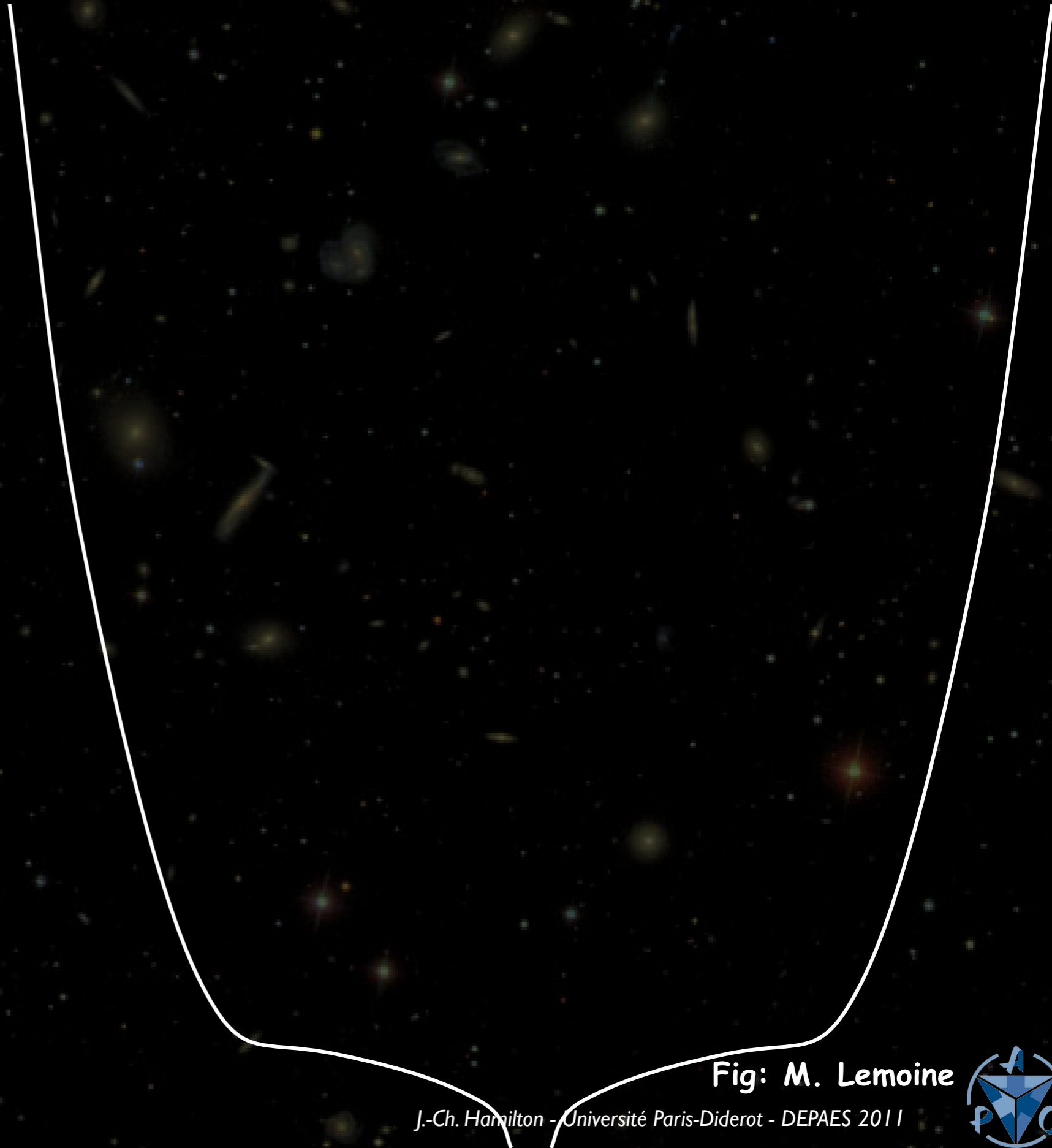


Fig: M. Lemoine

J.-Ch. Hamilton - Université Paris-Diderot - DEPAES 2011



Petite Histoire de l'Univers

temps

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

inflation

Fig: M. Lemoine

J.-Ch. Han

Université Paris-Diderot - DEPAES 2011

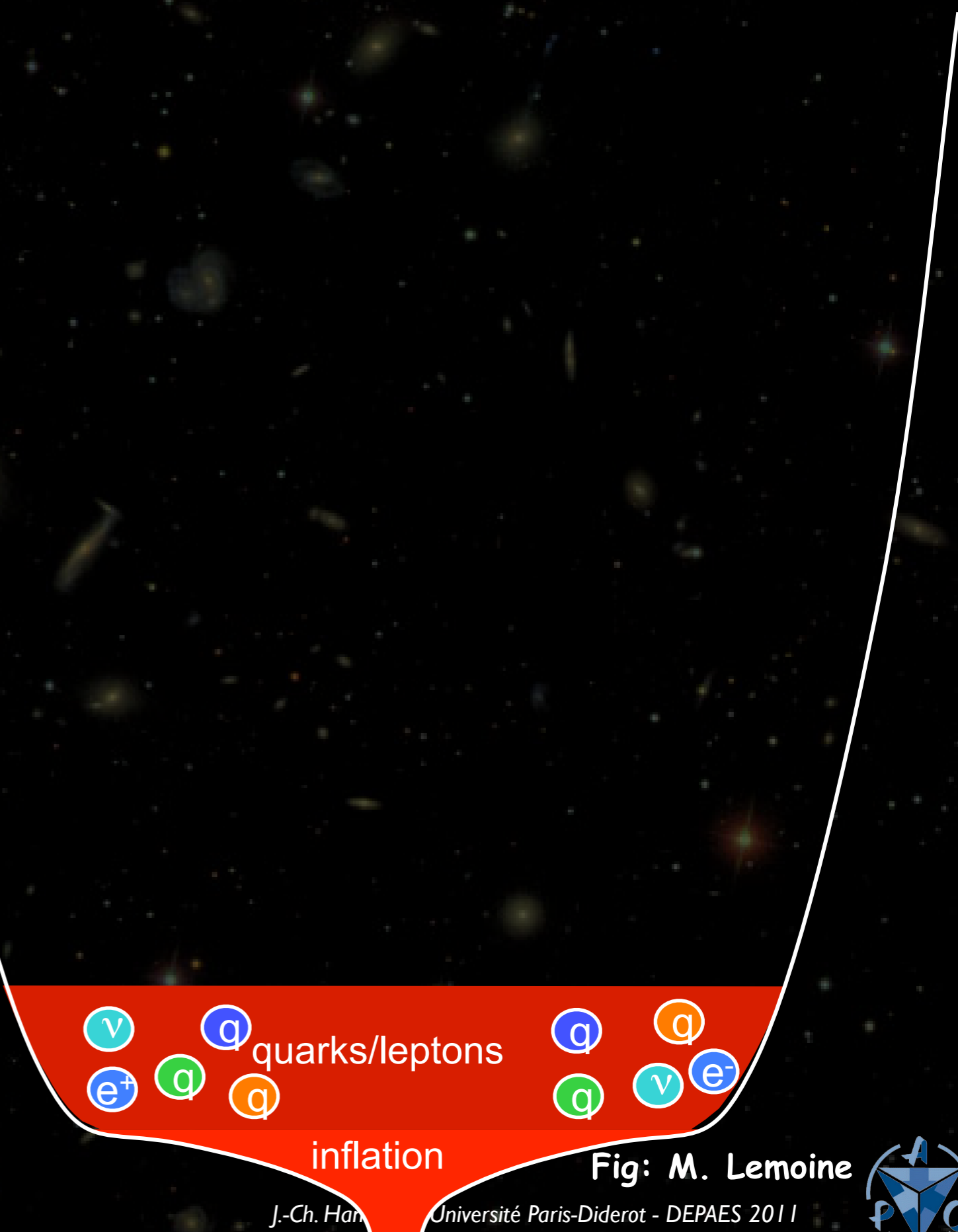


Petite Histoire de l'Univers

temps

confinement quarks — 10^{-6} sec

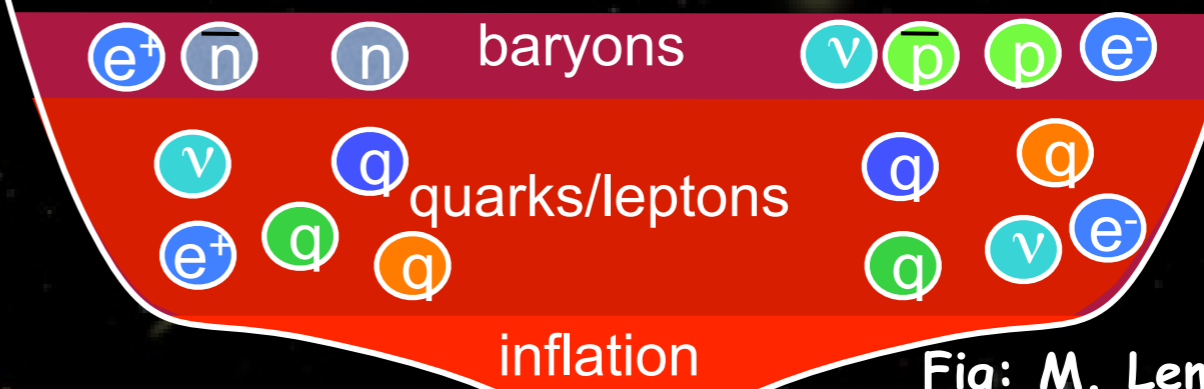
fin inflation — 10^{-33} sec
début ère rayonnement



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



Transitions de phase

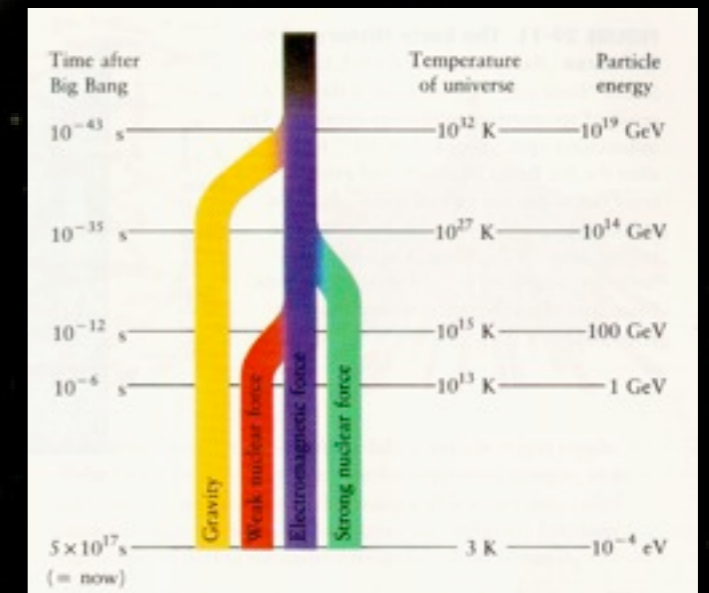
- Séparation entre interactions

- ★ 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

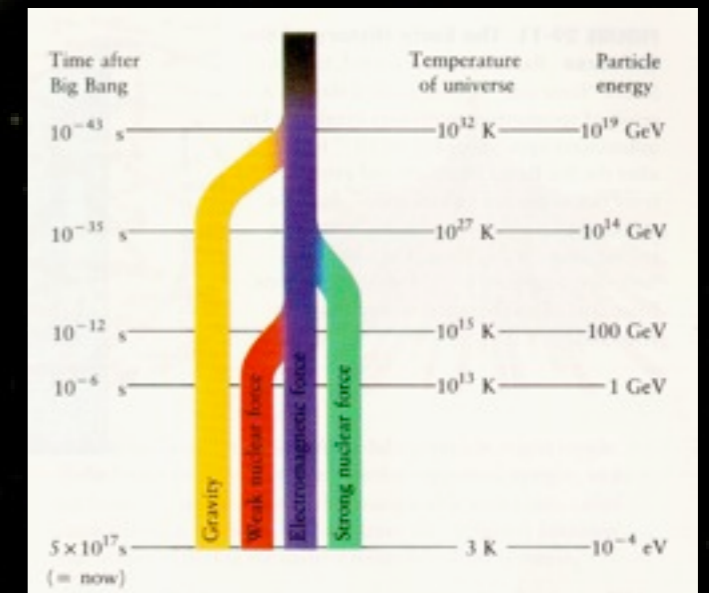
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Transitions de phase

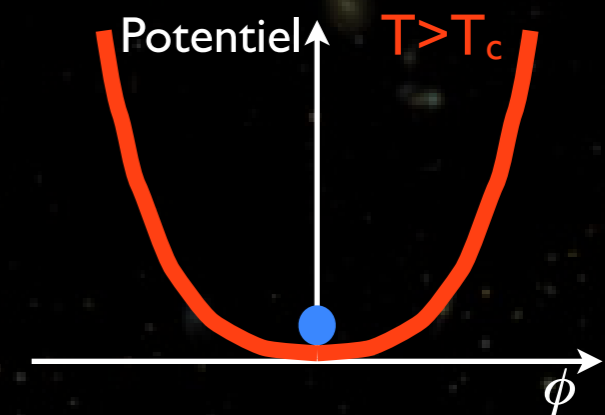
- Séparation entre interactions

- ★ 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



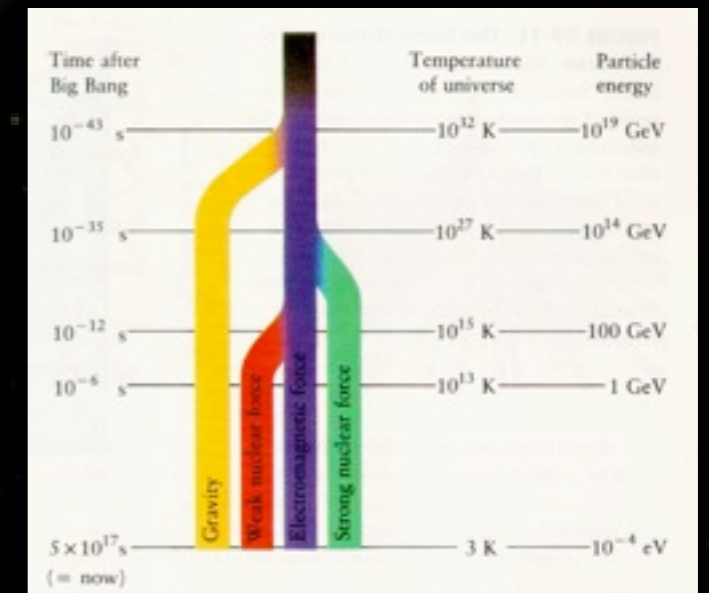
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Transitions de phase

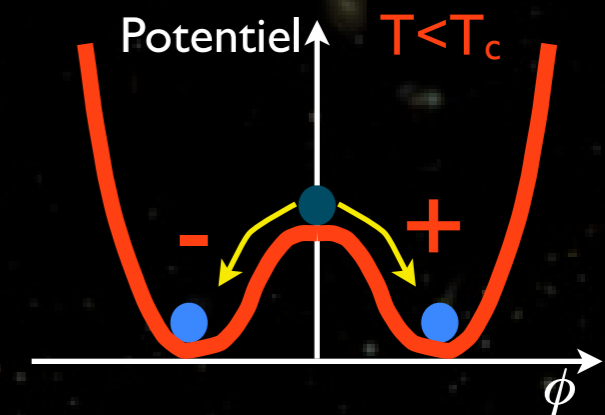
- Séparation entre interactions

- ★ 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



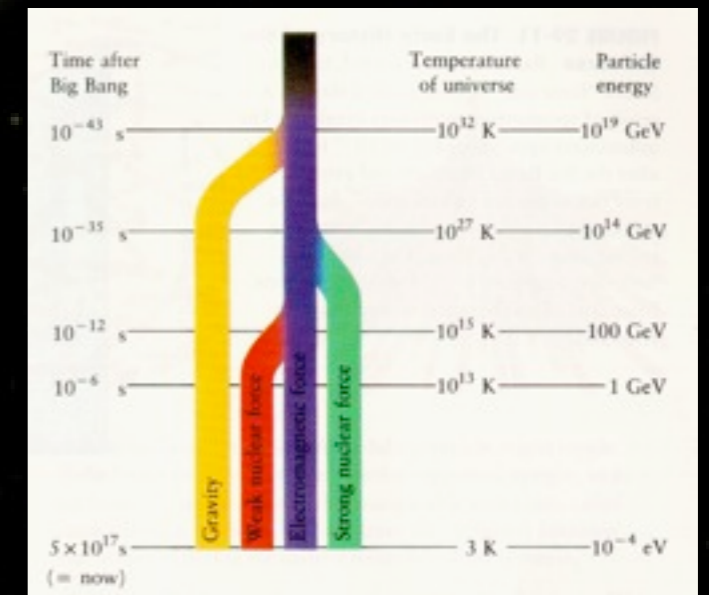
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Transitions de phase

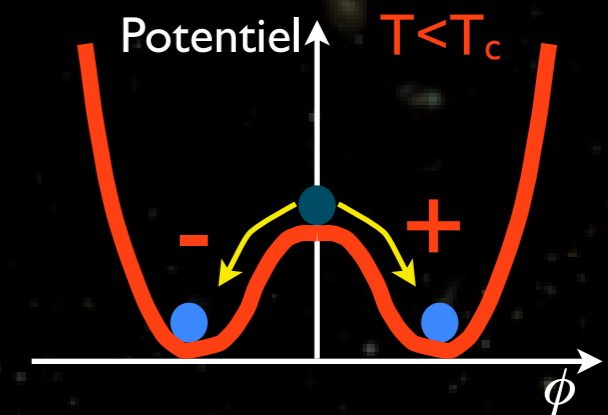
- Séparation entre interactions

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

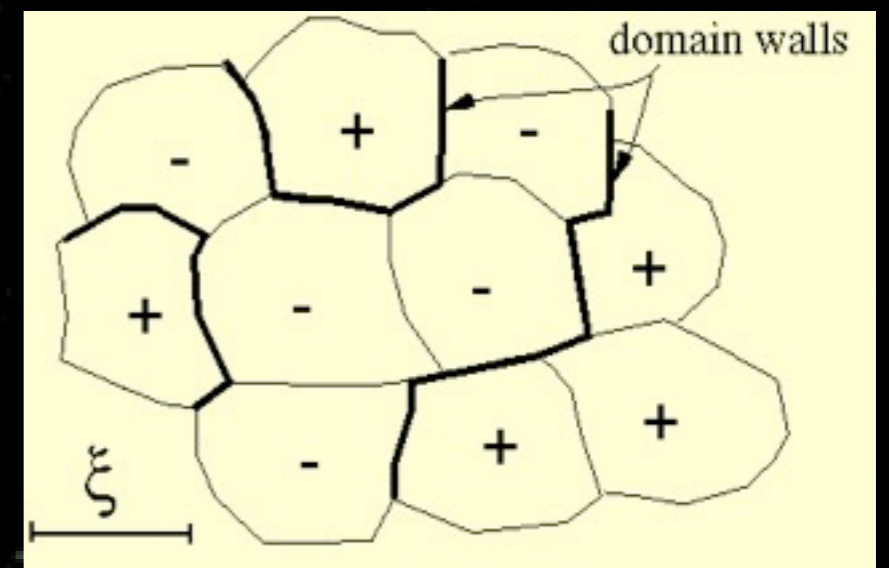


- Défauts topologiques

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



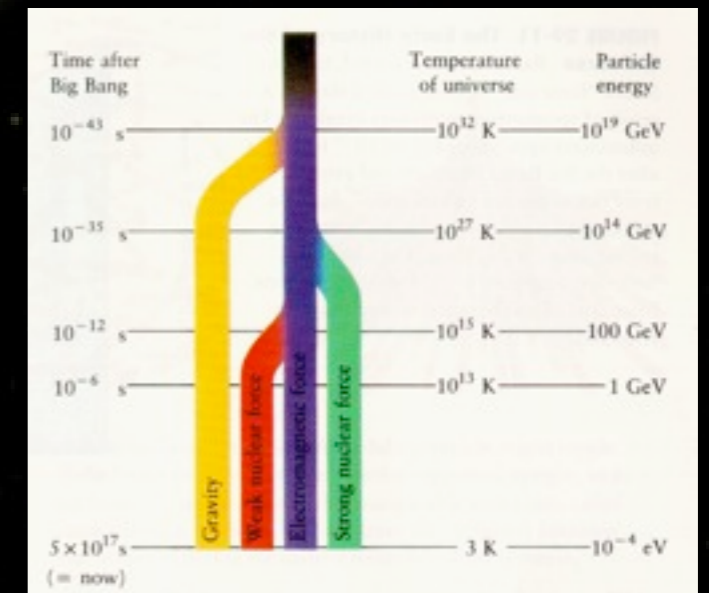
- Leur découverte permettrait de mieux comprendre l'Univers primordial



Transitions de phase

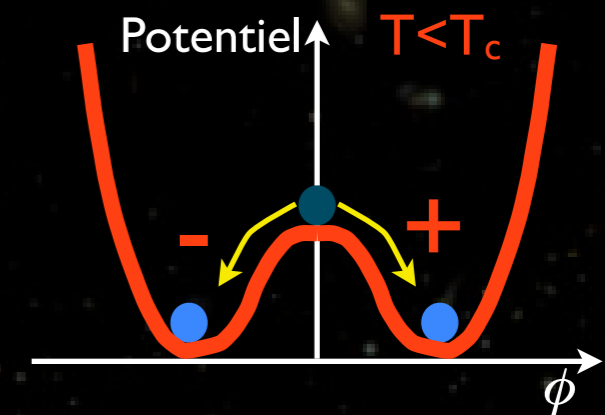
- Séparation entre interactions

- ★ 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



Petite Histoire de l'Univers

temps

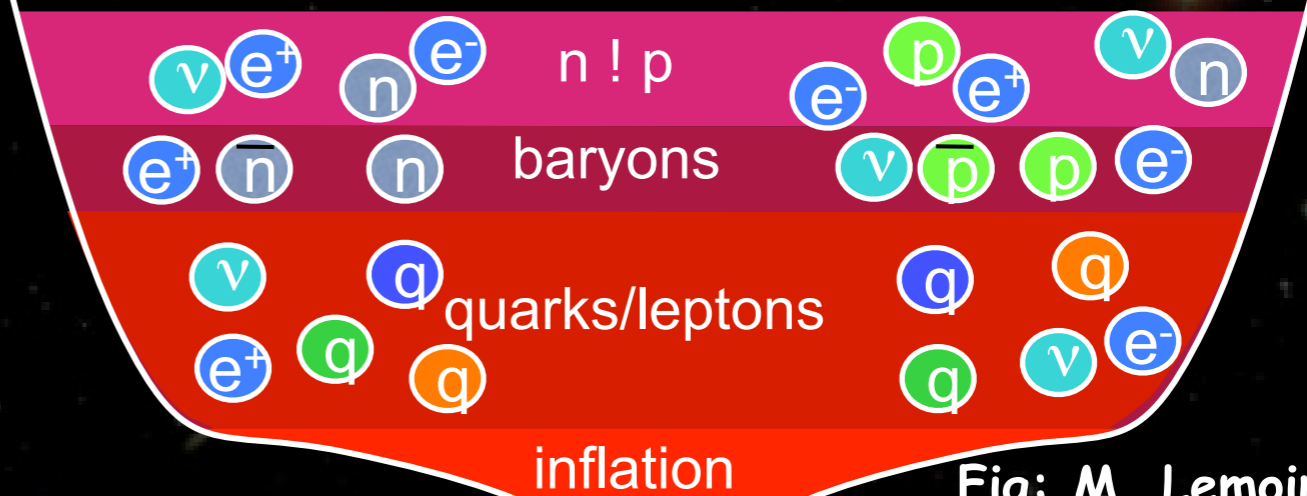
disparition anti-hadrons — 10^{-4} sec
confinement quarks — 10^{-6} sec
fin inflation — 10^{-33} sec
début ère rayonnement



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

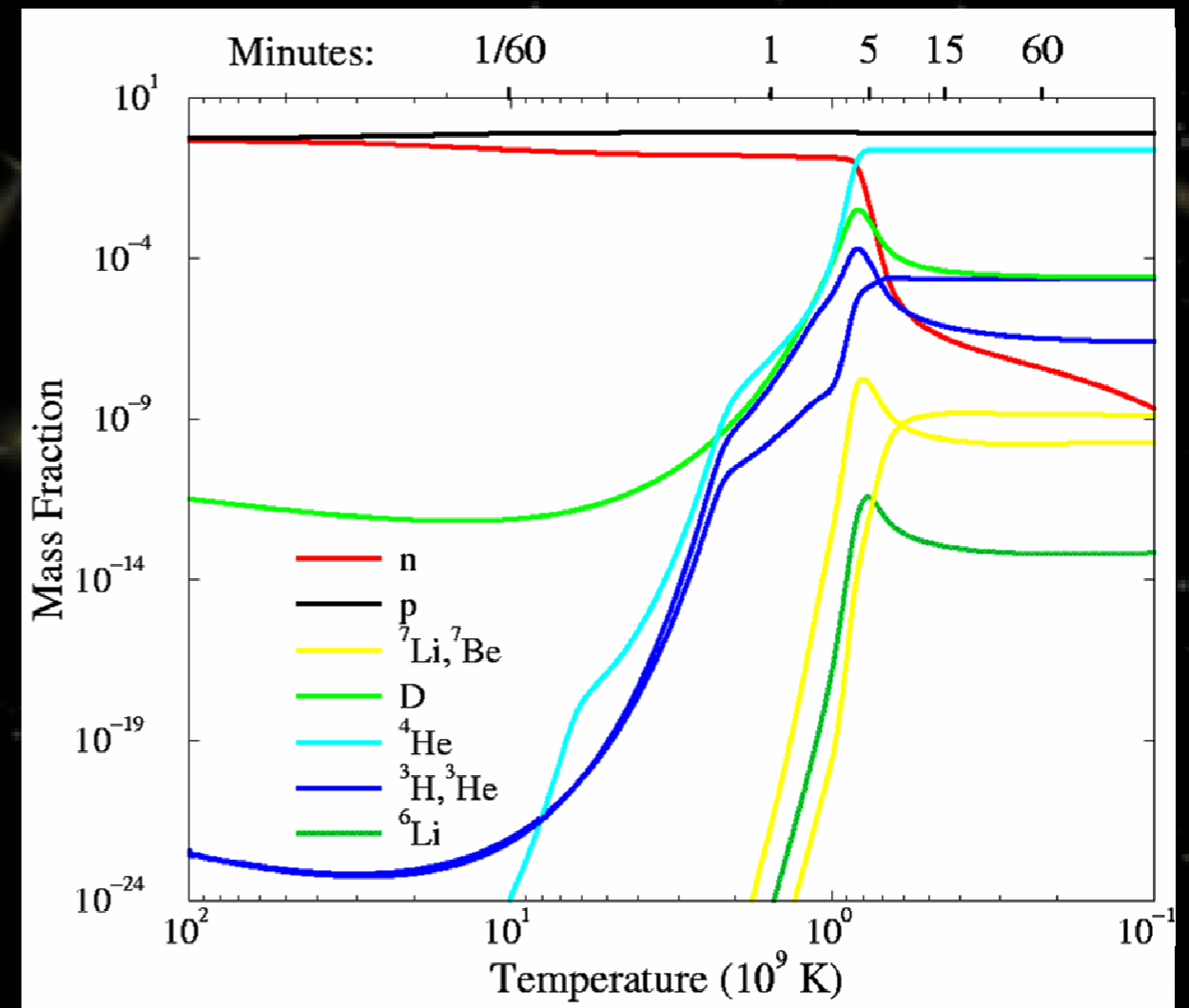
- Fin ~ 20 min.

- ★ 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

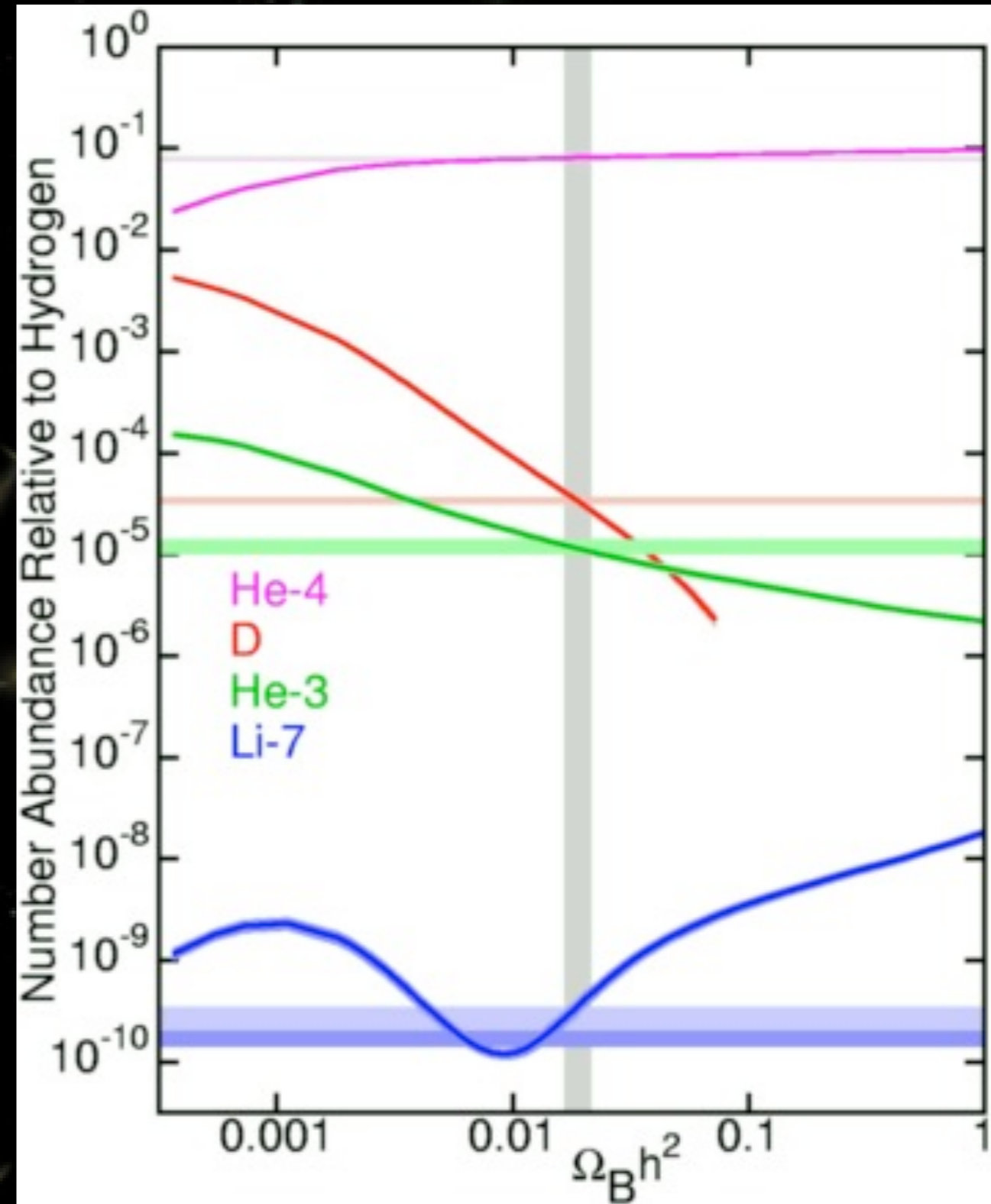
The Origin of Elements and the Separation of Galaxies

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)

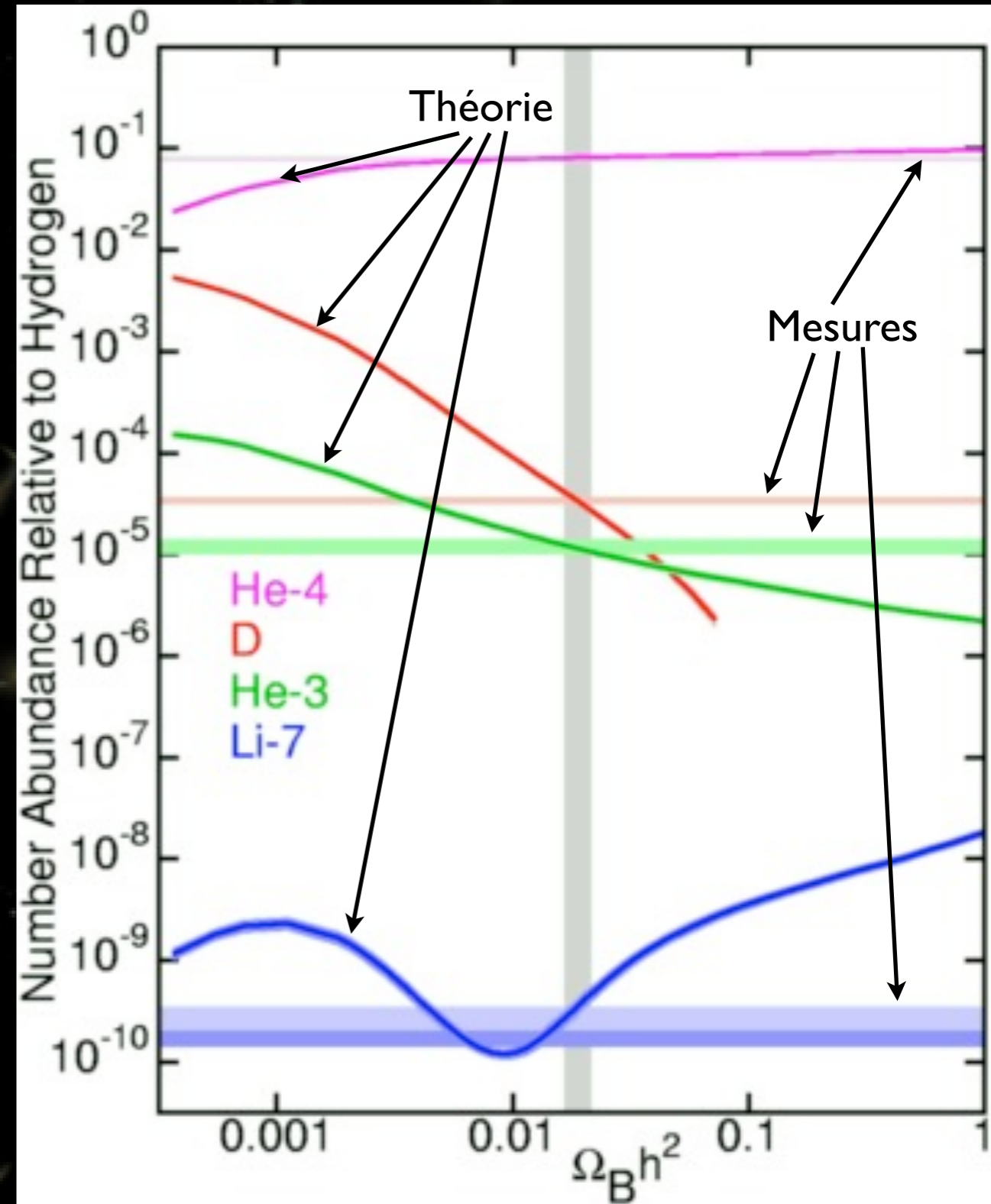
- Début : ~ 3 min.

- ★ 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)

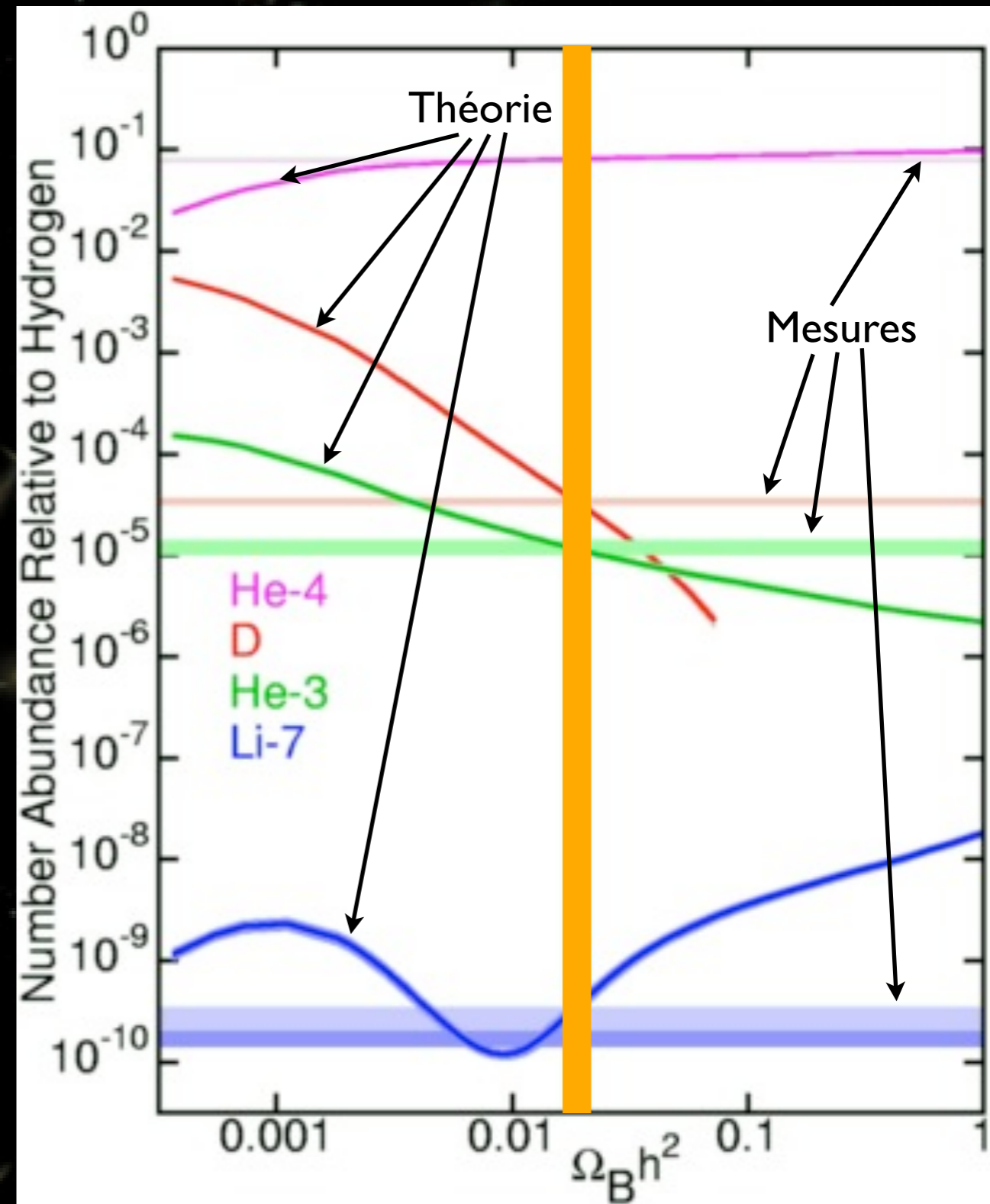
- Début : ~ 3 min.

- ★ 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)

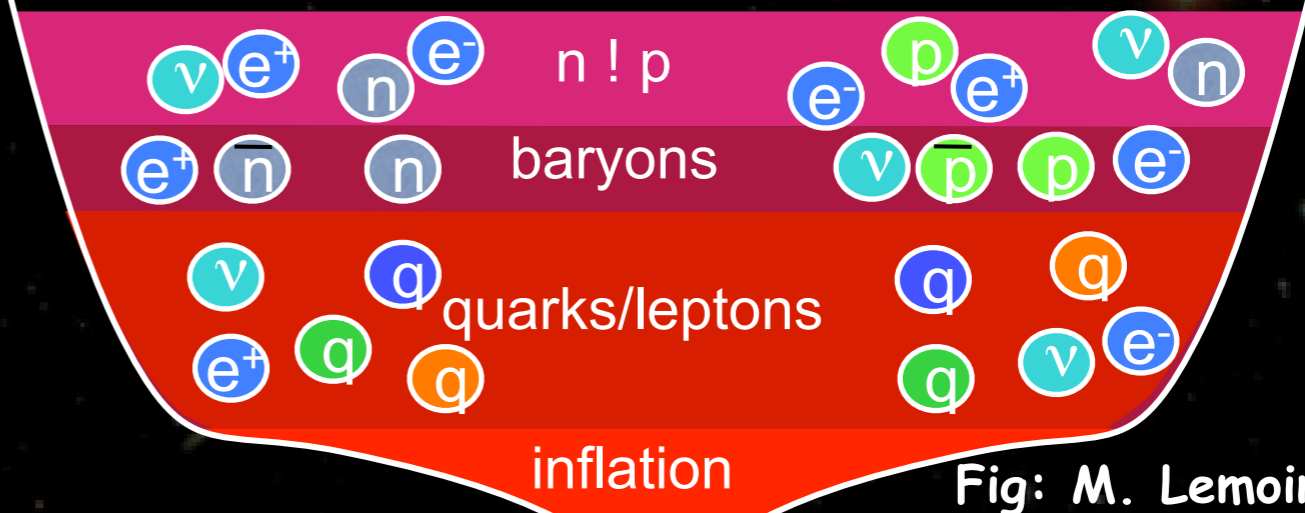
- Remarquable accord avec les observations



Petite Histoire de l'Univers

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

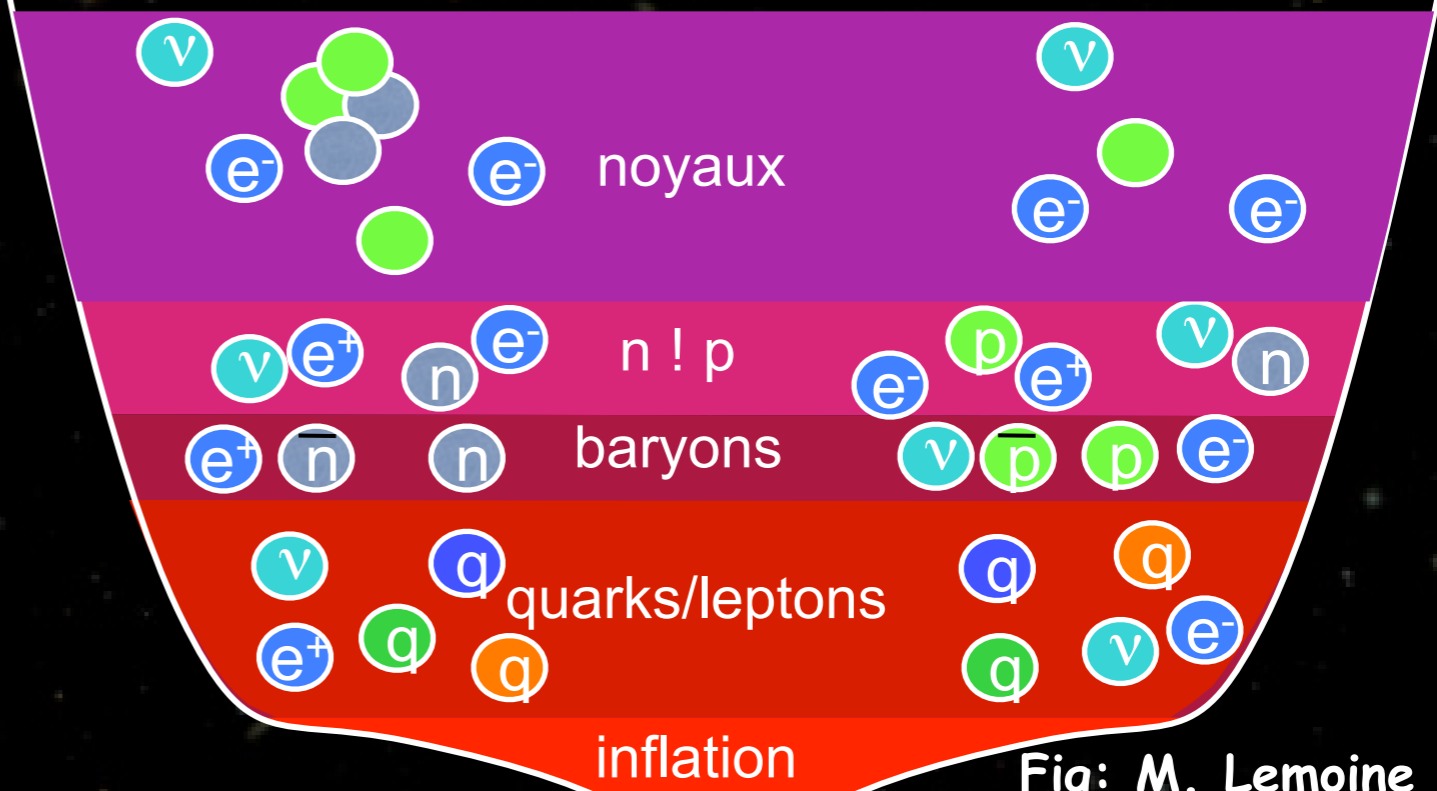
10^{-4} sec

confinement
quarks

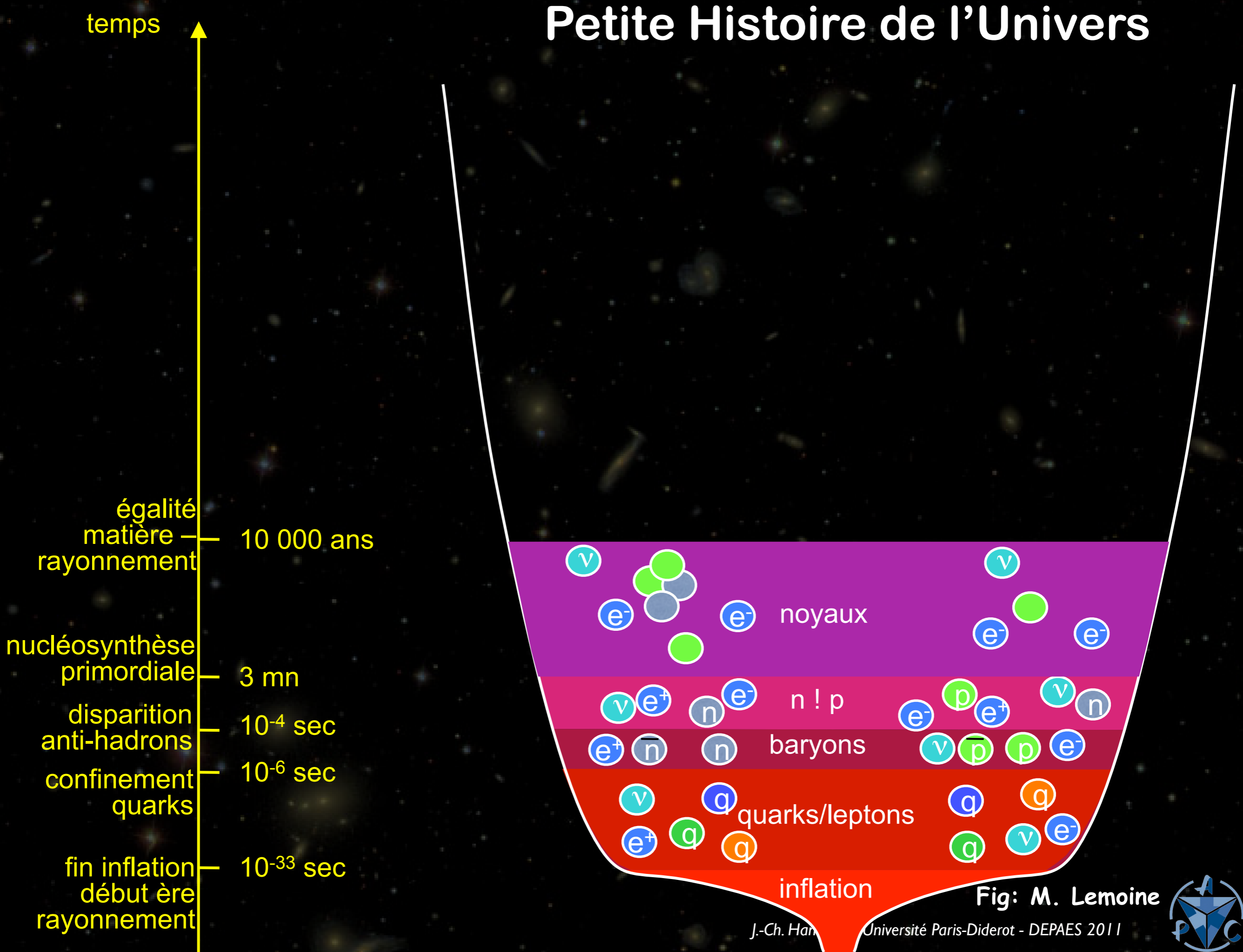
10^{-6} sec

fin inflation
début ère
rayonnement

10^{-33} sec

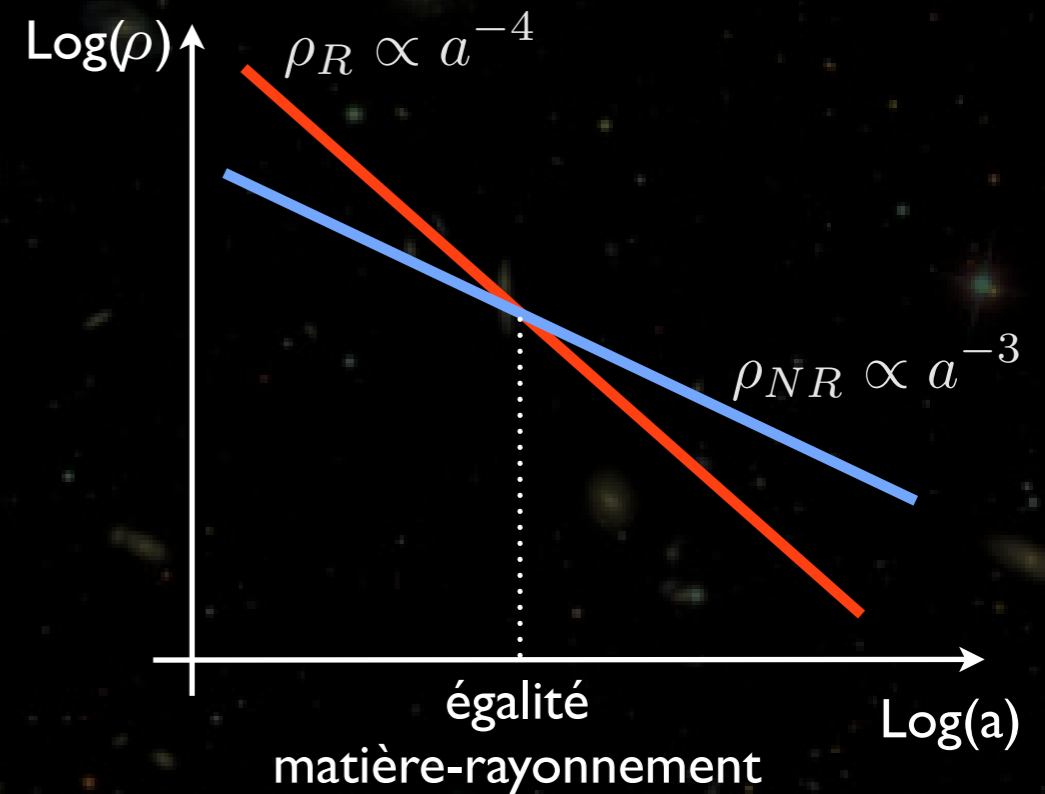


Petite Histoire de l'Univers



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 !



Petite Histoire de l'Univers

temps

nucléosynthèse
primordiale

3 mn

disparition
anti-hadrons

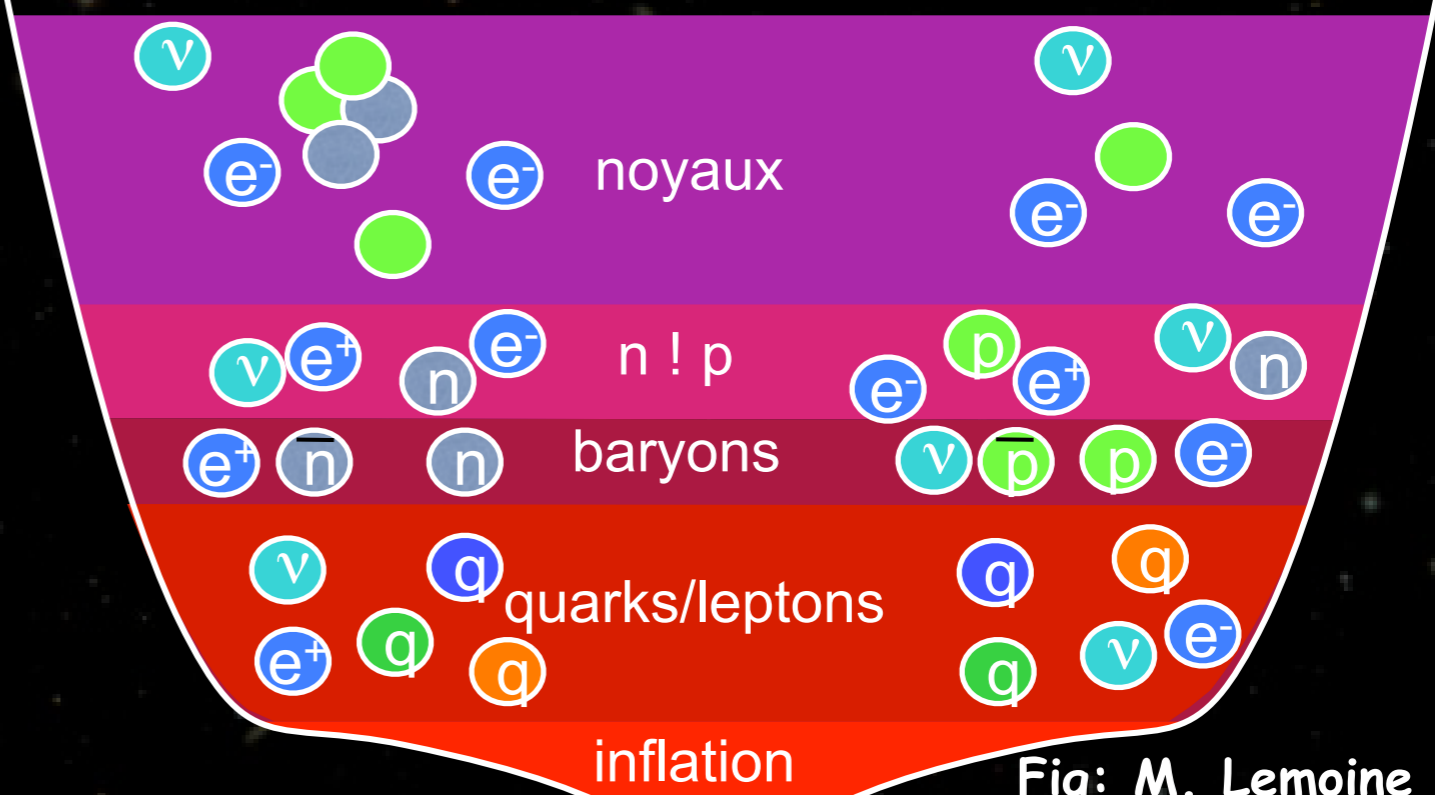
10^{-4} sec

confinement
quarks

10^{-6} sec

fin inflation
début ère
rayonnement

10^{-33} sec



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

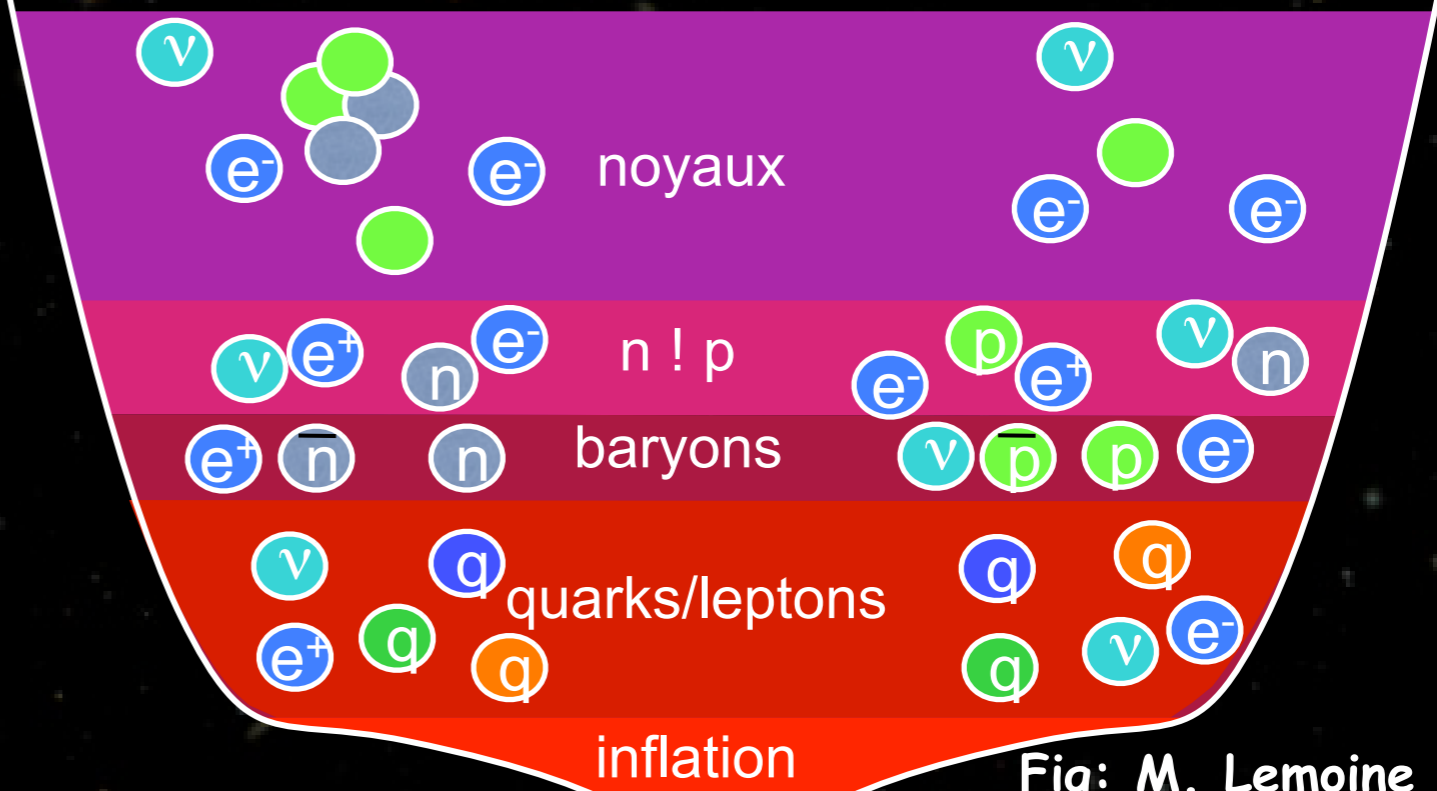
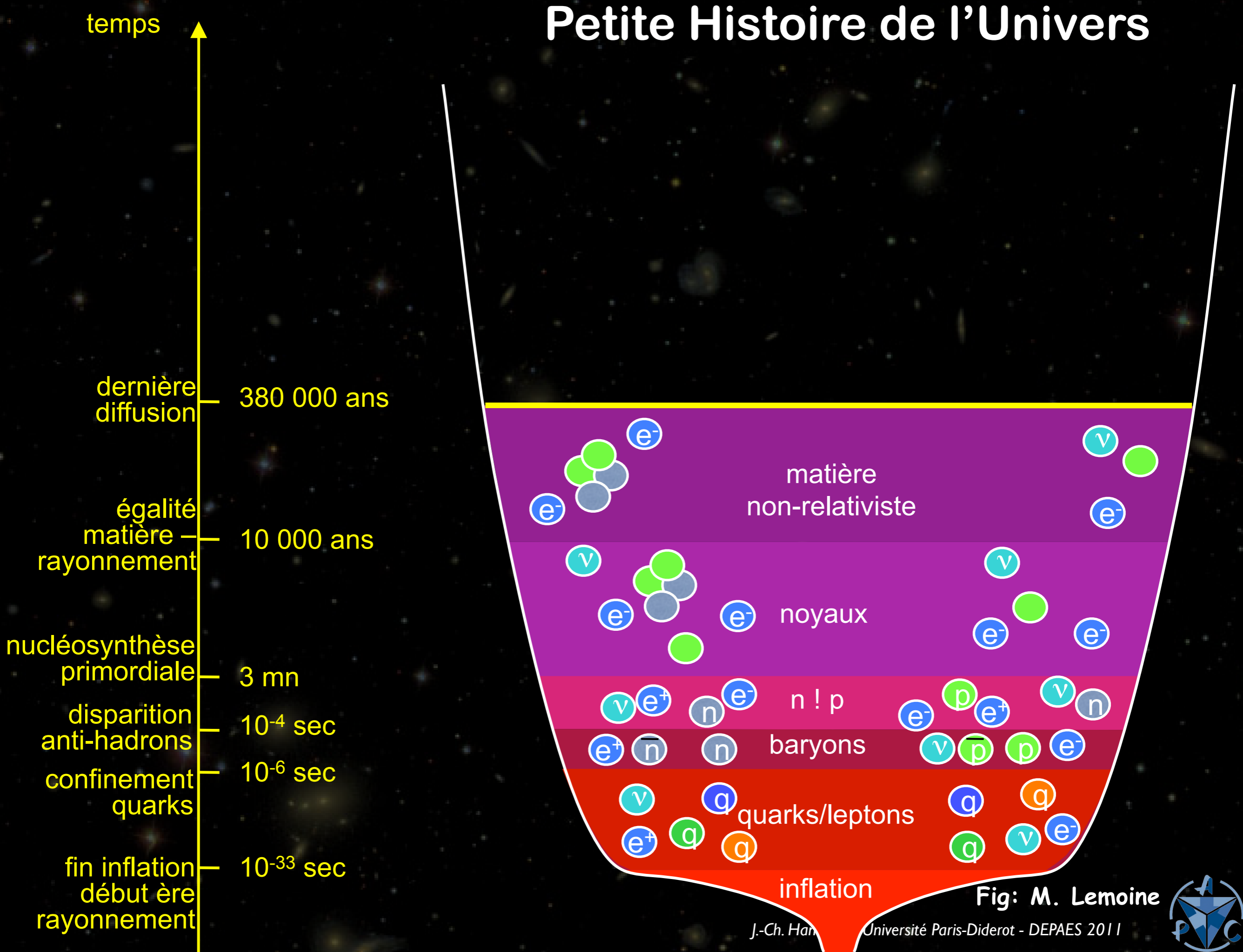


Fig: M. Lemoine

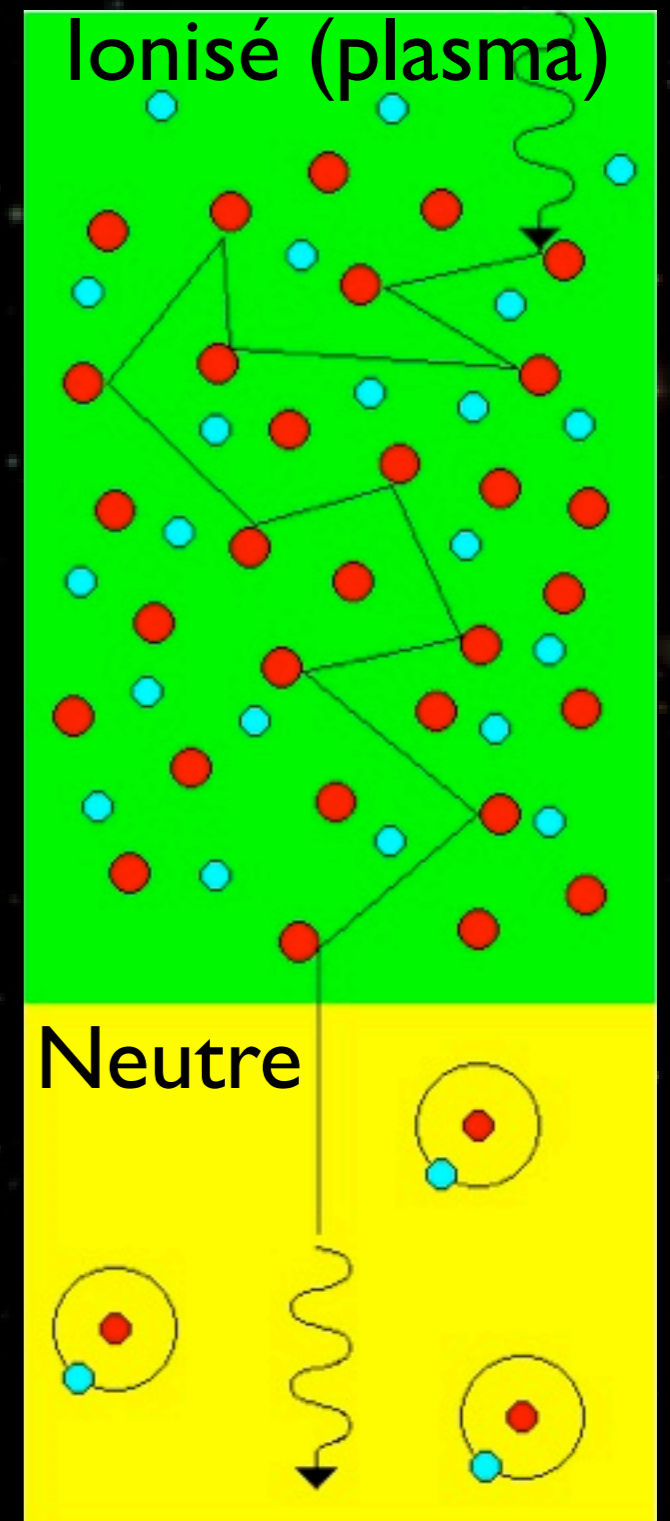


Petite Histoire de l'Univers



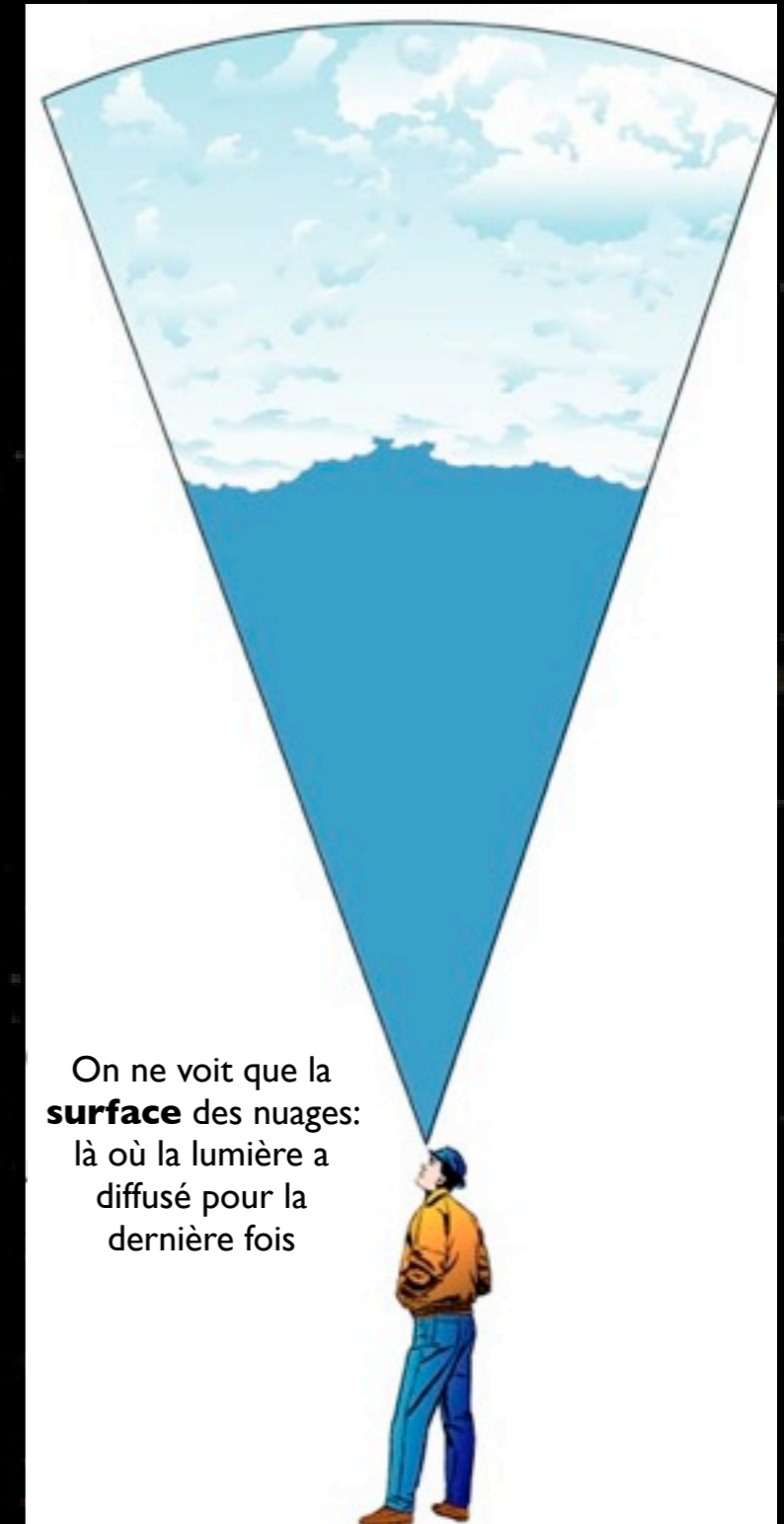
Découplage Matière-rayonnement

- Noyaux, électrons et photons
 - ★ Interactions continues
 - ★ Équilibre thermodynamique
 - ★ Libre parcours moyen des photons court
 - ★ Univers opaque
- La température baisse
 - ★ $T < 13.6 \text{ eV} - 3000 \text{ K}$
 - ★ Électrons et noyaux forment des atomes
 - ★ Les photons n'interagissent plus
 - ★ Univers transparent
- Émission du fond diffus cosmologique
 - ★ 3000 K à $z=1000$
 - ★ 3 K aujourd'hui
 - ★ Rayonnement sur tout le ciel
 - ★ Photographie de l'Univers à $z=1000$
 - endroits plus denses = plus chauds
 - endroits moins denses = moins chauds



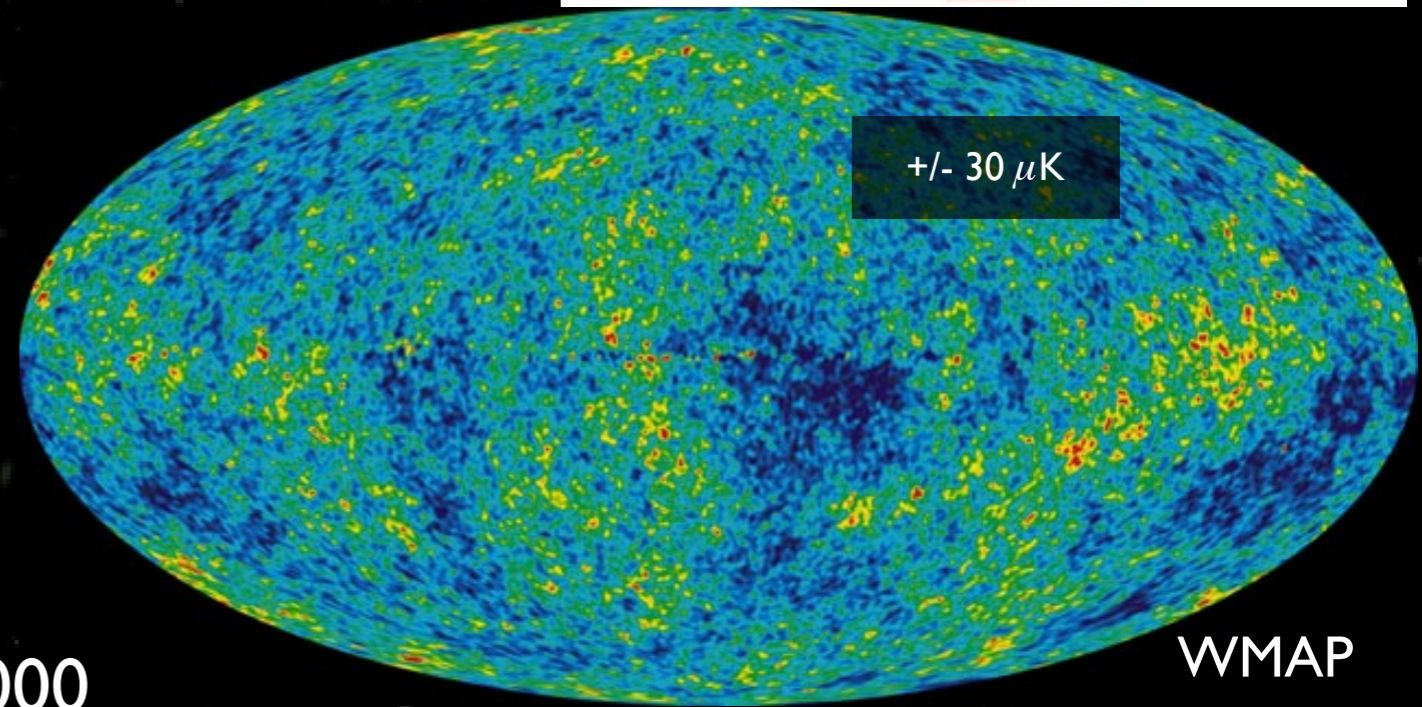
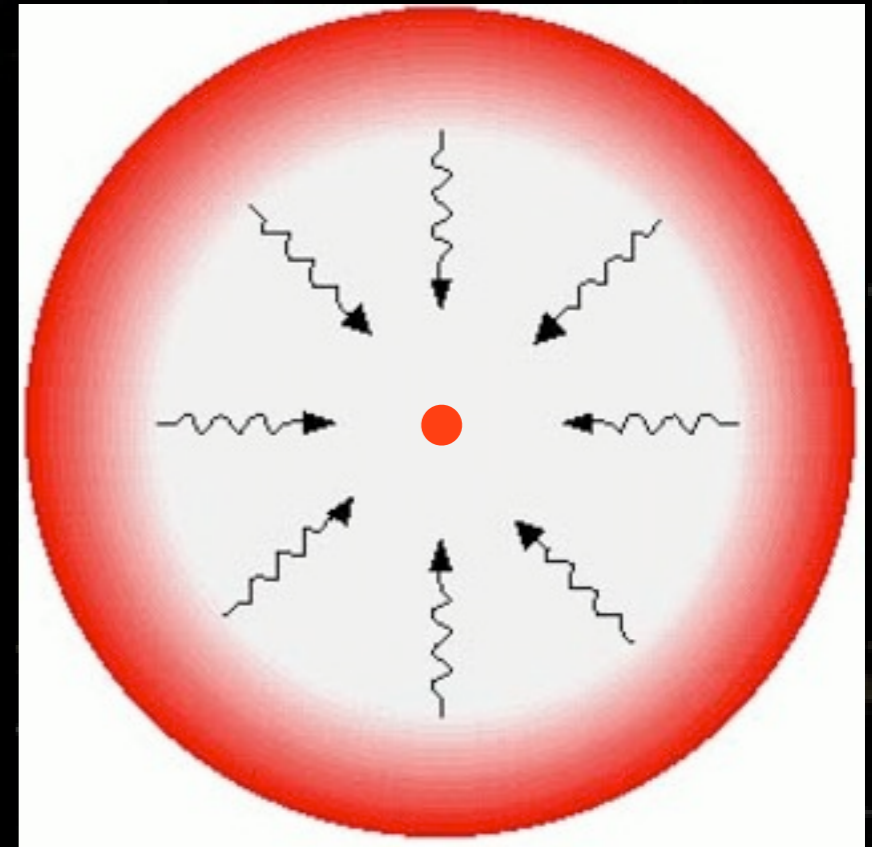
Découplage Matière-rayonnement

- Noyaux, électrons et photons
 - ★ Interactions continues
 - ★ Équilibre thermodynamique
 - ★ Libre parcours moyen des photons court
 - ★ Univers opaque
- La température baisse
 - ★ $T < 13.6 \text{ eV} - 3000\text{K}$
 - ★ Électrons et noyaux forment des atomes
 - ★ Les photons n'interagissent plus
 - ★ Univers transparent
- Émission du fond diffus cosmologique
 - ★ 3000 K à $z=1000$
 - ★ 3 K aujourd'hui
 - ★ Rayonnement sur tout le ciel
 - ★ Photographie de l'Univers à $z=1000$
 - endroits plus denses = plus chauds
 - endroits moins denses = moins chauds



Découplage Matière-rayonnement

- Noyaux, électrons et photons
 - ★ Interactions continues
 - ★ Équilibre thermodynamique
 - ★ Libre parcours moyen des photons court
 - ★ Univers opaque
- La température baisse
 - ★ $T < 13.6 \text{ eV} - 3000\text{K}$
 - ★ Électrons et noyaux forment des atomes
 - ★ Les photons n'interagissent plus
 - ★ Univers transparent
- Émission du fond diffus cosmologique
 - ★ 3000 K à $z=1000$
 - ★ 3 K aujourd'hui
 - ★ Rayonnement sur tout le ciel
 - ★ Photographie de l'Univers à $z=1000$
 - endroits plus denses = plus chauds
 - endroits moins denses = moins chauds



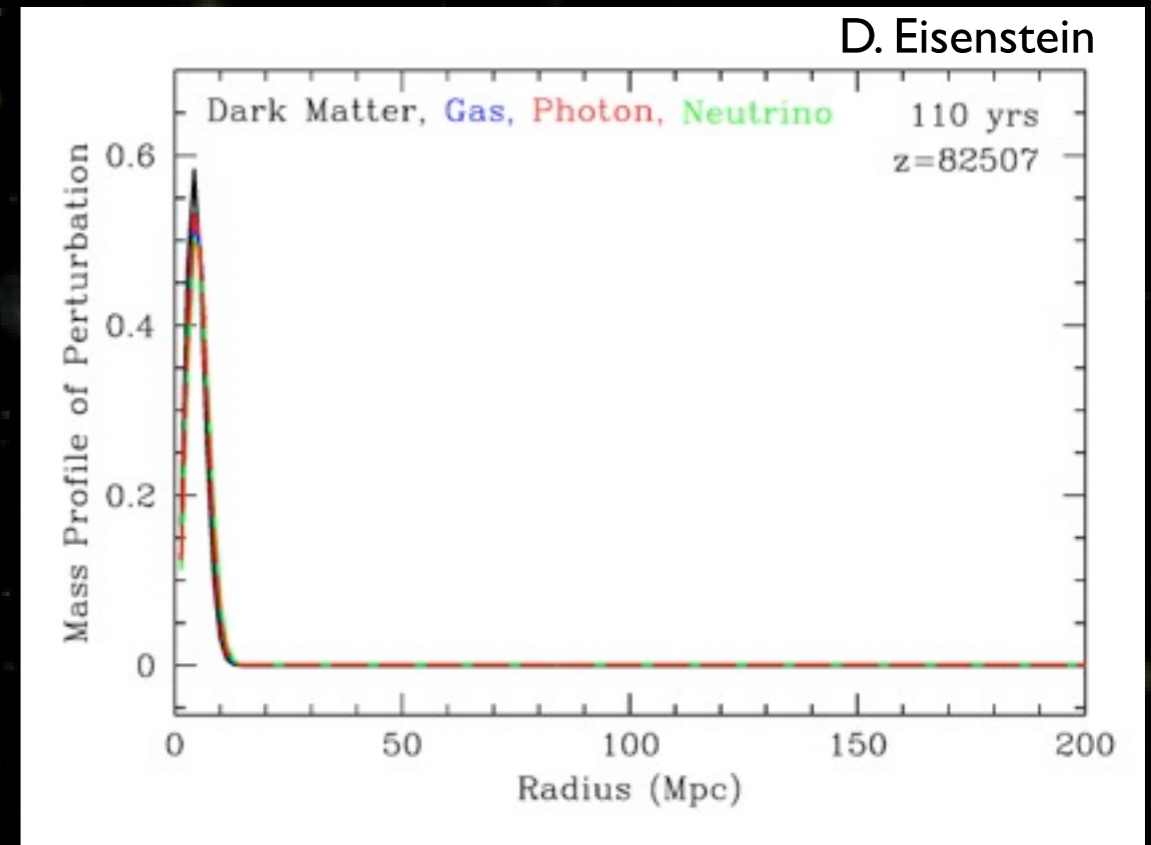
Pic Acoustique des Baryons

- à partir de l'égalité matière-rayonnement
 - ★ surdensité = onde de pression qui se propage (onde acoustique)
 - ★ Vitesse : vitesse du son dans le fluide
- Découplage matière-rayonnement
 - ★ L'onde s'arrête : les photons s'échappent
 - ★ Coquille de matière à 150 Mpc de la surdensité de matière noire
 - ★ Les deux surdensités s'équilibrent
 - ★ Il reste un pic à 150 Mpc : pic des oscillations acoustiques de baryons (BAO)
 - ★ CMB, Distribution des galaxies



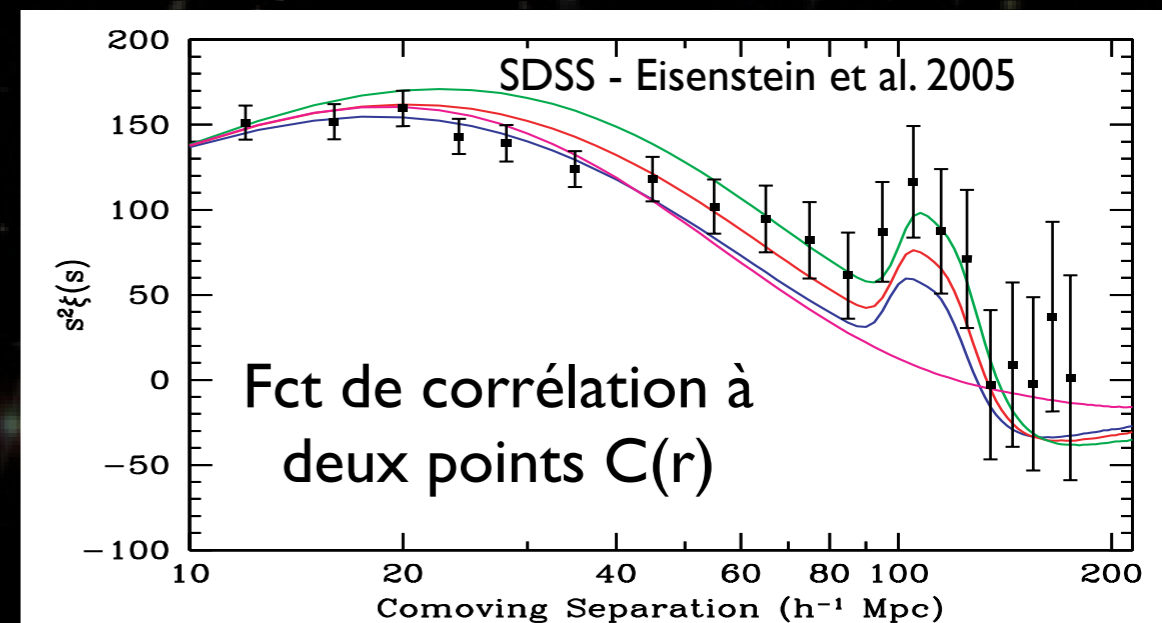
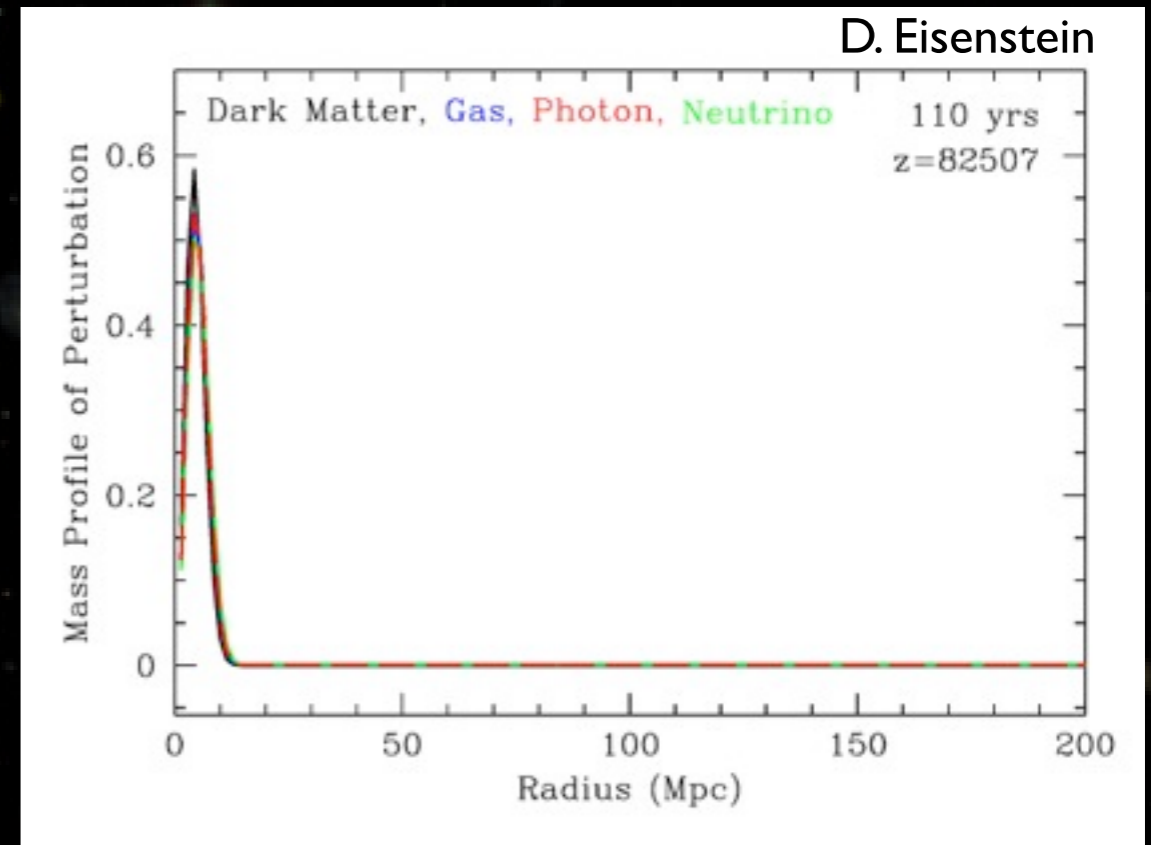
Pic Acoustique des Baryons

- à partir de l'égalité matière-rayonnement
 - ★ surdensité = onde de pression qui se propage (onde acoustique)
 - ★ Vitesse : vitesse du son dans le fluide
- Découplage matière-rayonnement
 - ★ L'onde s'arrête : les photons s'échappent
 - ★ Coquille de matière à 150 Mpc de la surdensité de matière noire
 - ★ Les deux surdensités s'équilibrent
 - ★ Il reste un pic à 150 Mpc : pic des oscillations acoustiques de baryons (BAO)
 - ★ CMB, Distribution des galaxies

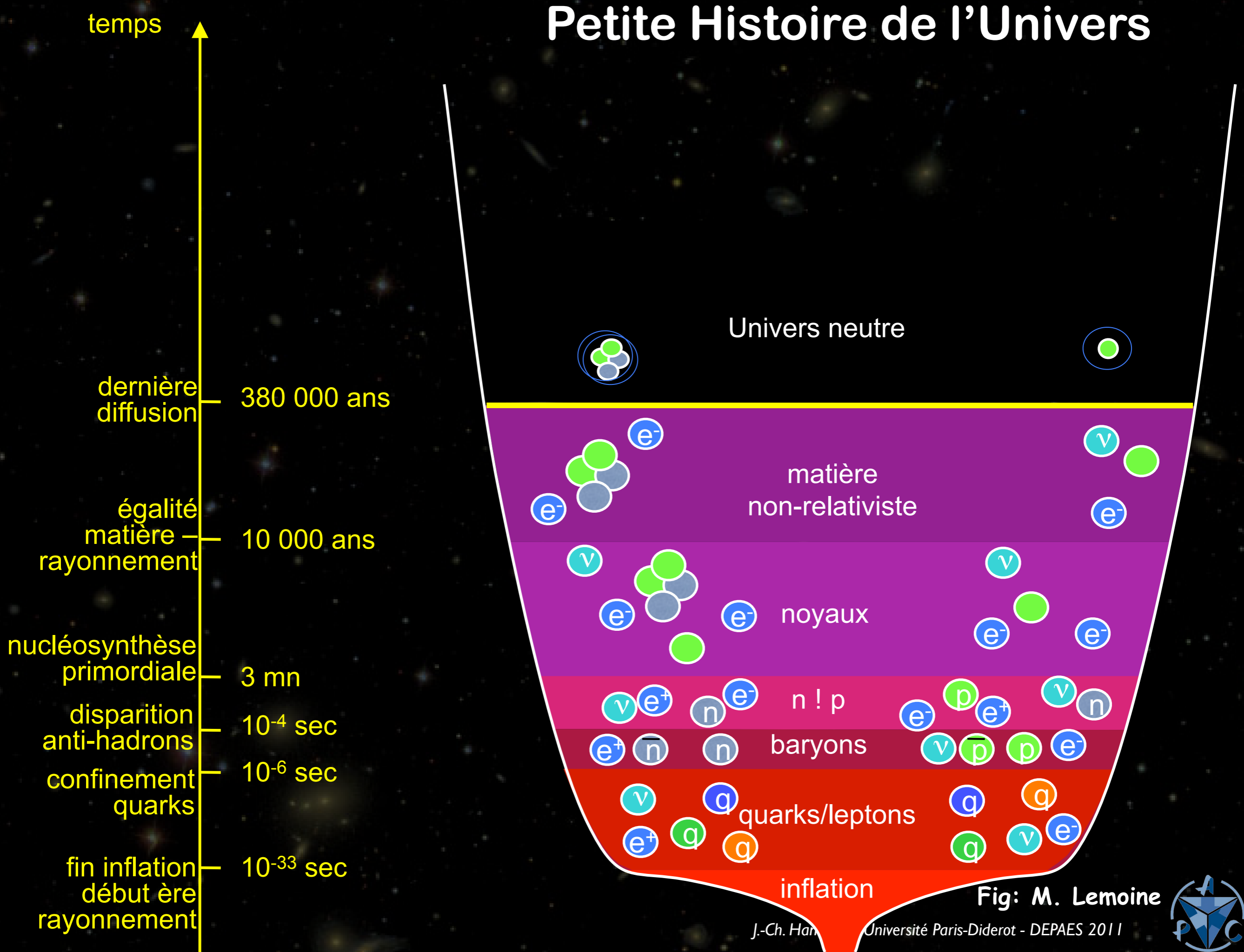


Pic Acoustique des Baryons

- à partir de l'égalité matière-rayonnement
 - ★ surdensité = onde de pression qui se propage (onde acoustique)
 - ★ Vitesse : vitesse du son dans le fluide
- Découplage matière-rayonnement
 - ★ L'onde s'arrête : les photons s'échappent
 - ★ Coquille de matière à 150 Mpc de la surdensité de matière noire
 - ★ Les deux surdensités s'équilibrent
 - ★ Il reste un pic à 150 Mpc : pic des oscillations acoustiques de baryons (BAO)
 - ★ CMB, Distribution des galaxies



Petite Histoire de l'Univers



Ages sombres : Formation des structures

- La matière s'effondre sur les surdensités de matière noire
 - ★ Toujours pas d'étoiles
 - ★ seuls photons:
 - raie d'émission de l'hydrogène neutre (21 cm)
 - CMB
- Lutte entre:
 - ★ effondrement gravitationnel
 - ★ expansion de l'Univers
- Au delà d'un certain contraste de densité
 - ★ La structure s'effondre et ne voit plus l'expansion
- Des structures de plus en plus grosses se forment par collisions

Le taux de croissance des structures va dépendre des paramètres cosmologiques



Ages sombres : Formation des structures

- La matière s'effondre sur les surdensités de matière noire
 - ★ Toujours pas d'étoiles
 - ★ seuls photons:
 - raie d'émission de l'hydrogène neutre (21 cm)
 - CMB
- Lutte entre:
 - ★ effondrement gravitationnel
 - ★ expansion de l'Univers
- Au delà d'un certain contraste de densité
 - ★ La structure s'effondre et ne voit plus l'expansion
- Des structures de plus en plus grosses se forment par collisions

$R = 6.0 \text{ Mpc}$

$z = 10.155$



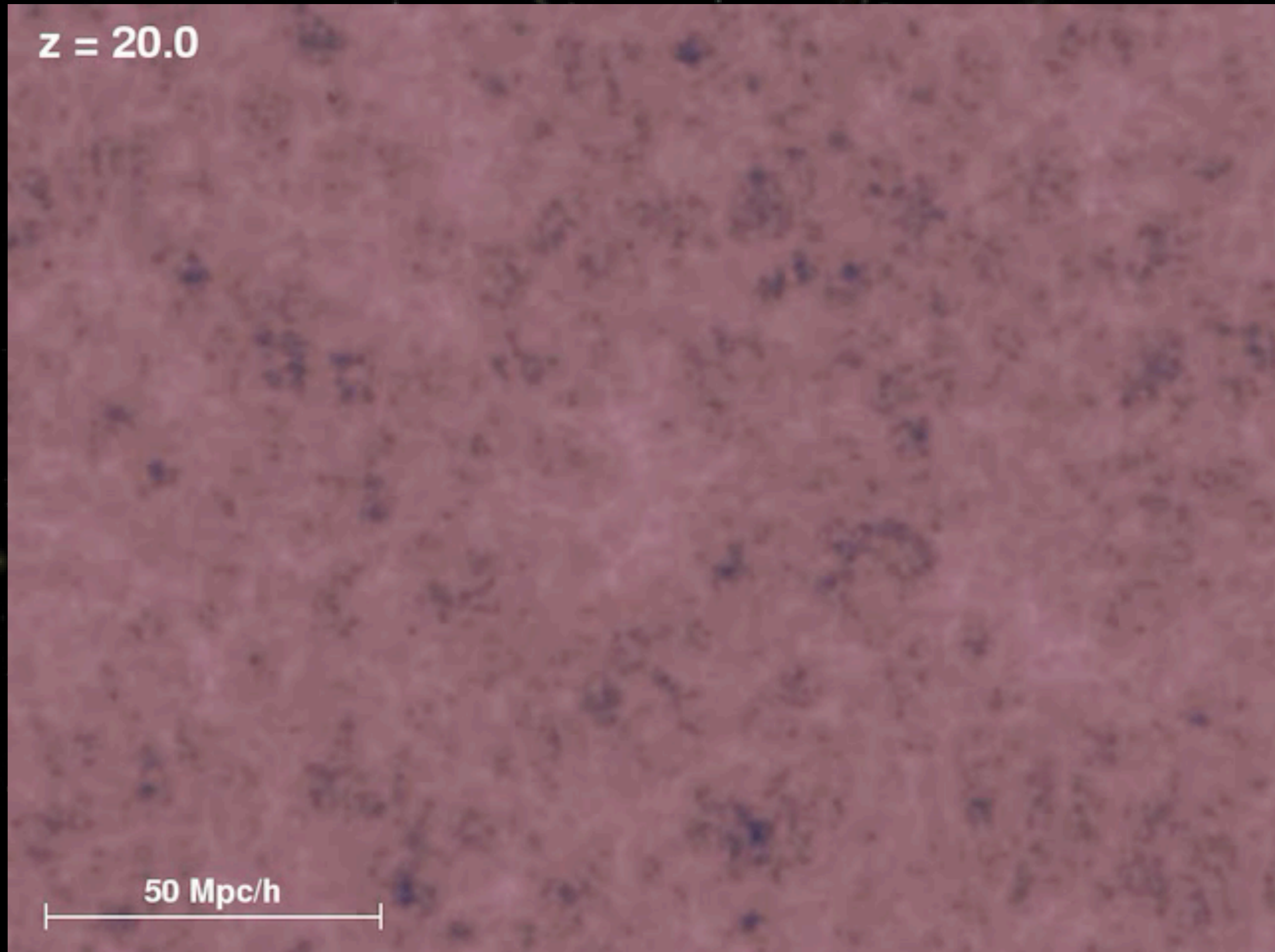
$a = 0.090$

diemand 2003

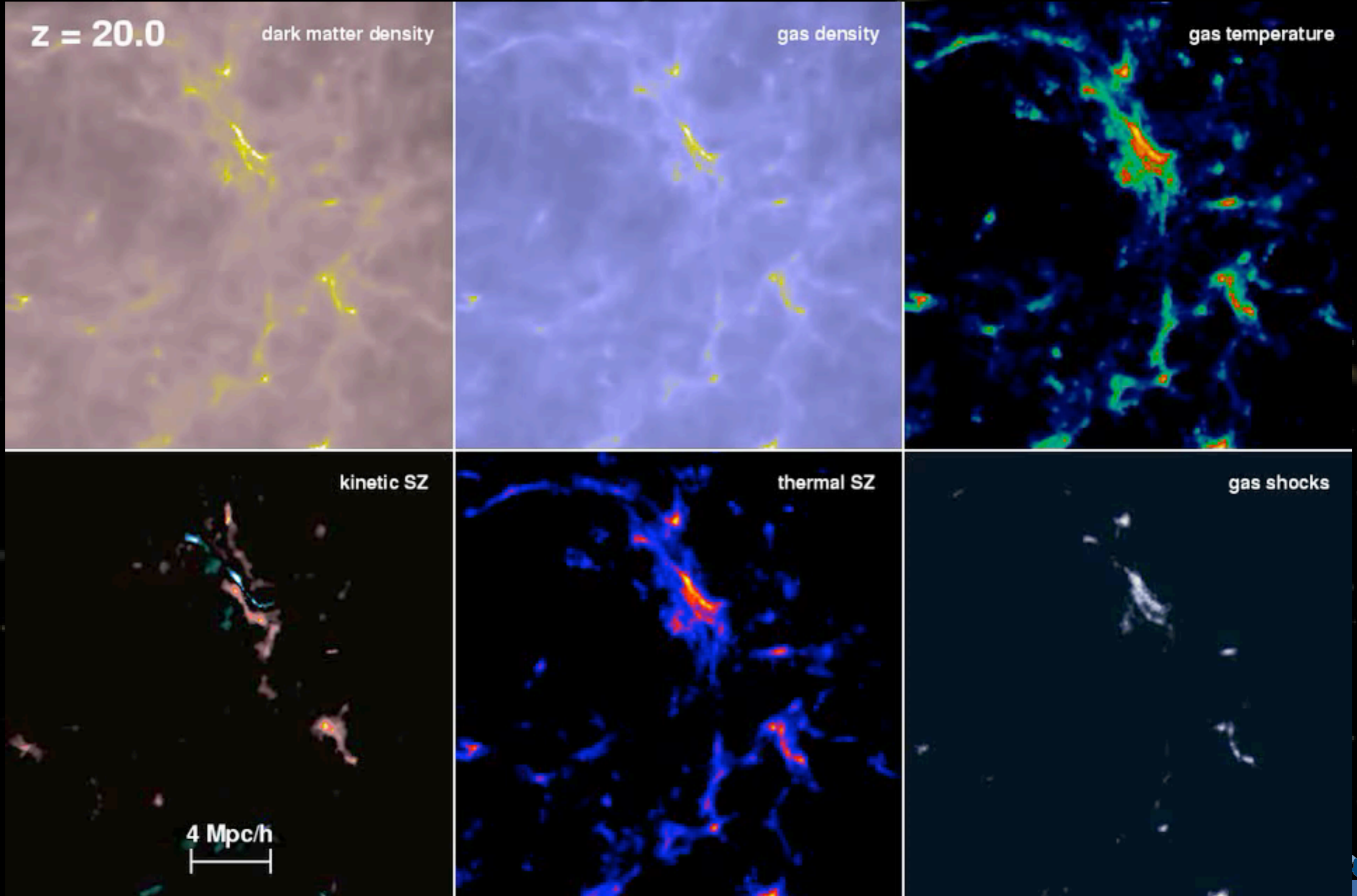
Le taux de croissance des structures va dépendre des paramètres cosmologiques



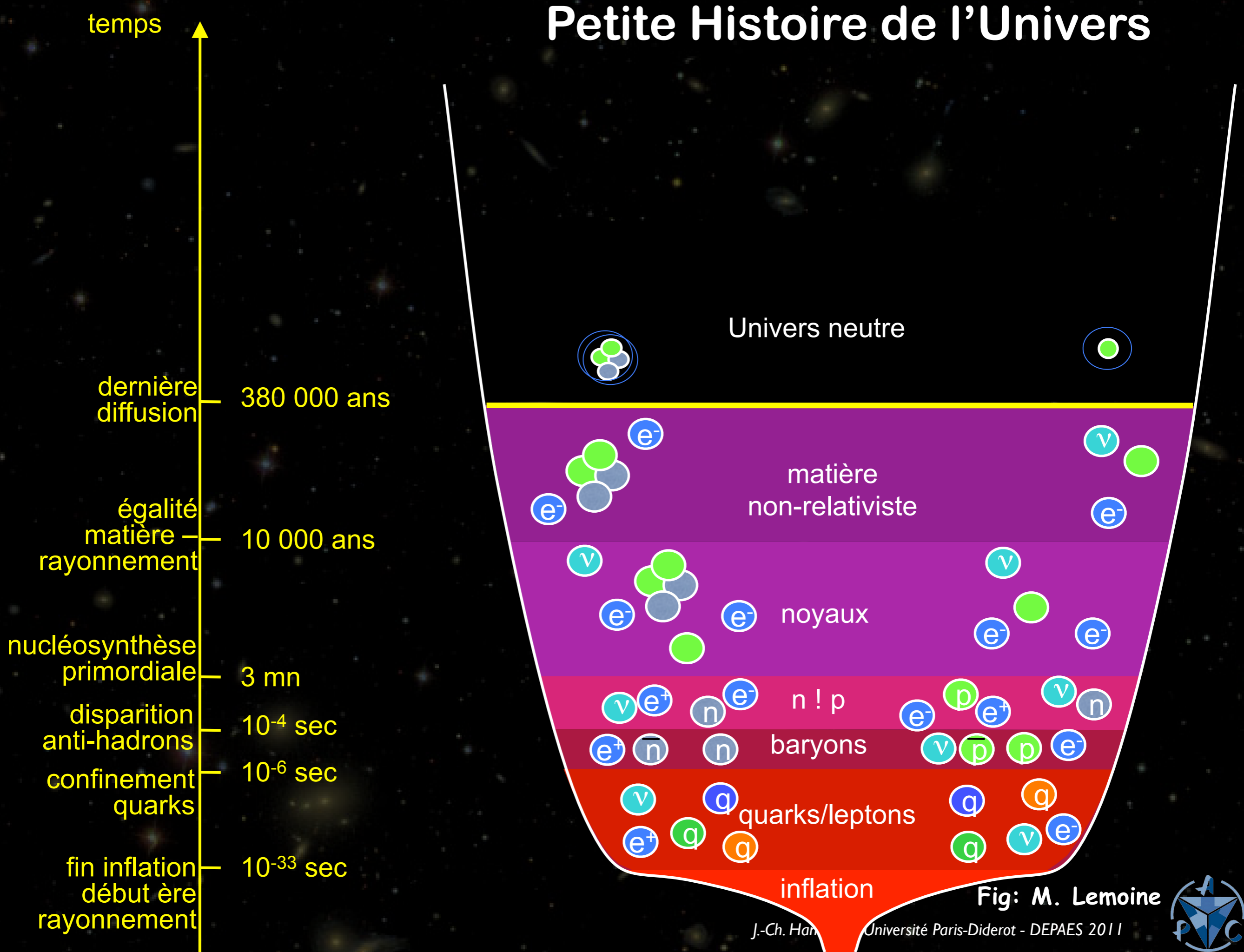
Simulation N corps en coordonnées comobiles



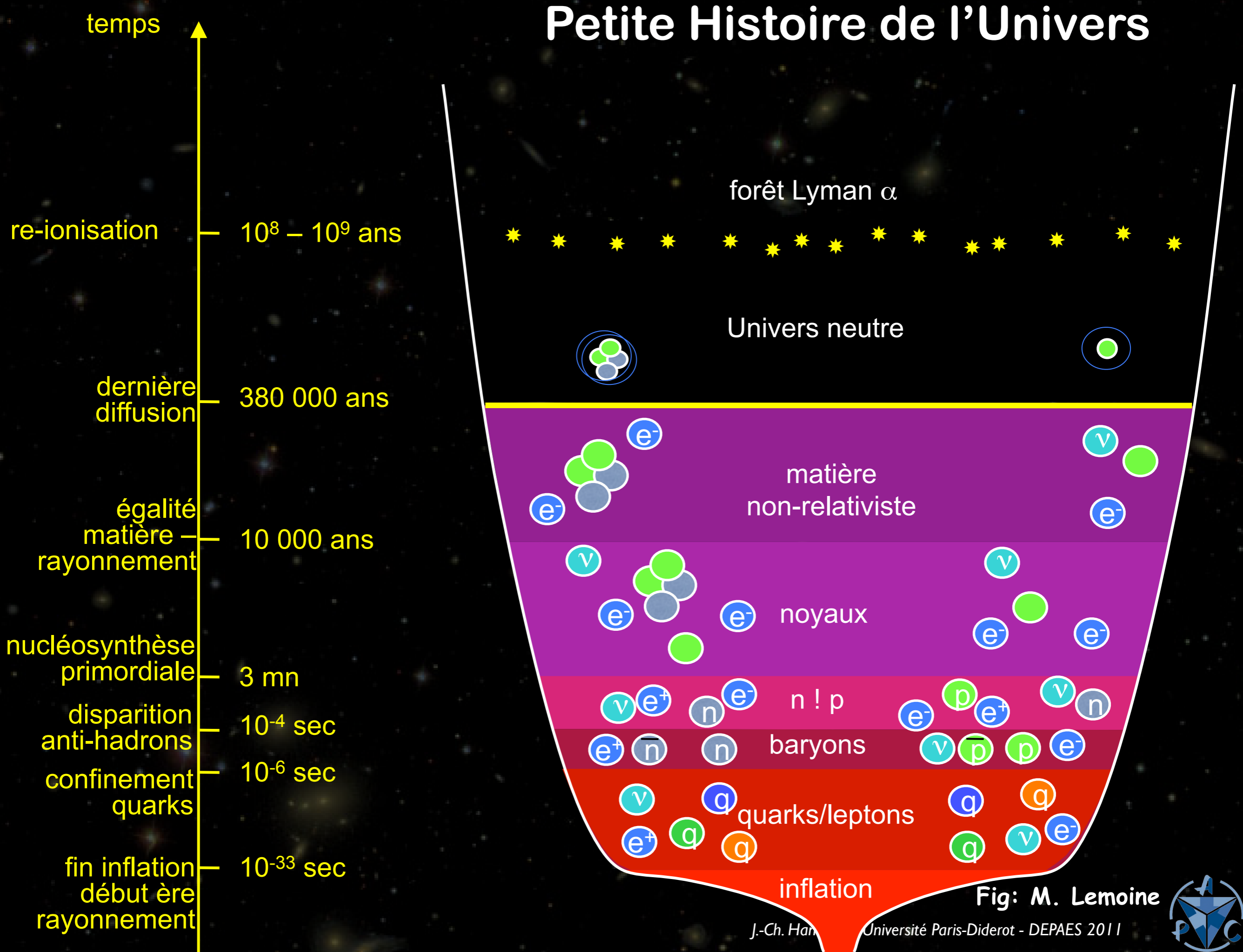
Formation des amas (merging)



Petite Histoire de l'Univers



Petite Histoire de l'Univers



Ré-ionisation

- **Ages sombres $1000 > z > 15$:**

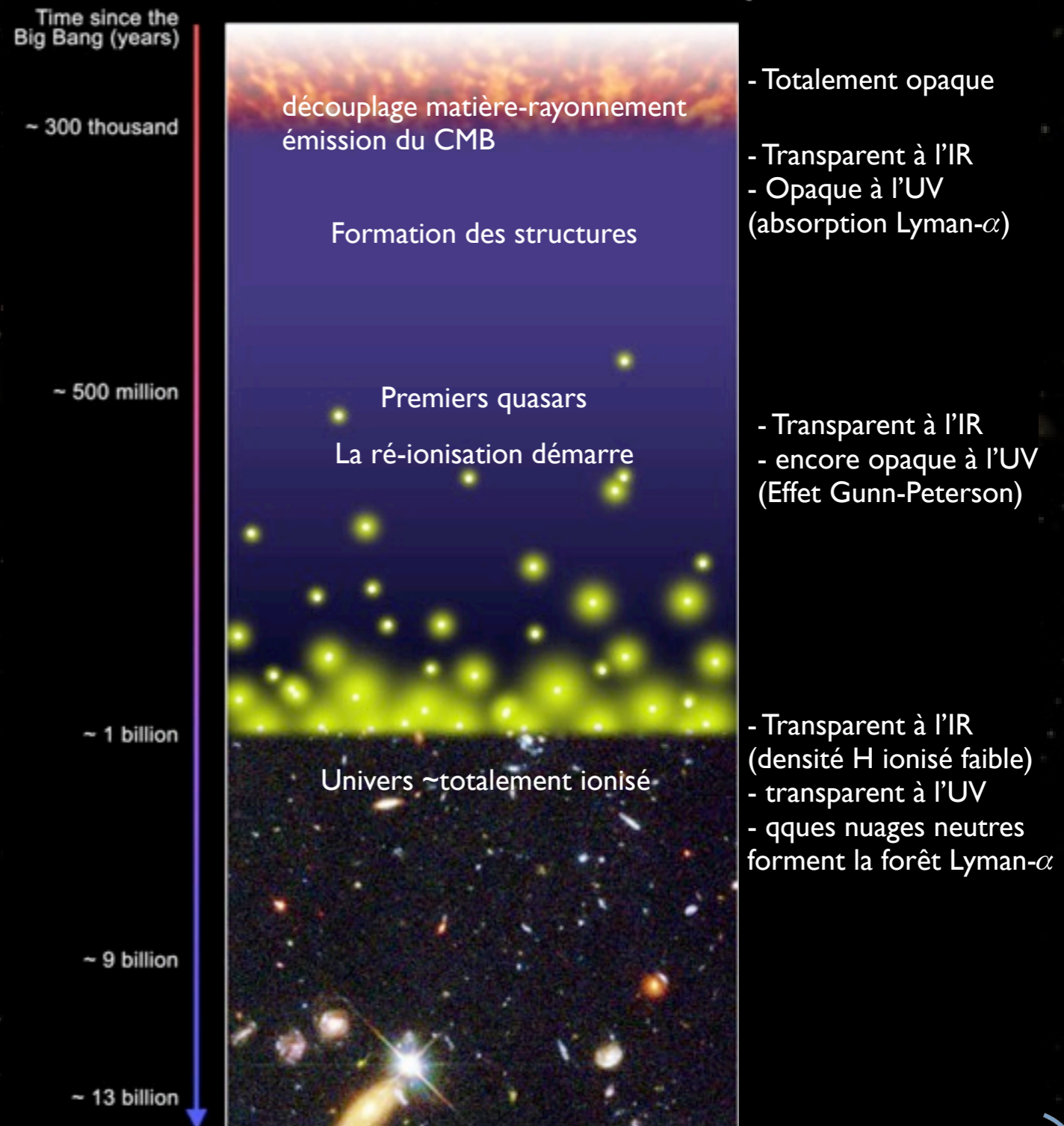
- ★ CMB + 21cm (IR et radio)
- ★ La raie d'absorption de l'hydrogène neutre (1215 \AA - Lyman- α) absorberait tout rayonnement UV.

- **Vers $z \sim 15$: premiers quasars**

- ★ Formés par effondrement
- ★ Emission intense en UV
 - totalement absorbée par la raie Lyman- α (effet Gunn-Peterson)

What is the Reionization Era?

A Schematic Outline of the Cosmic History



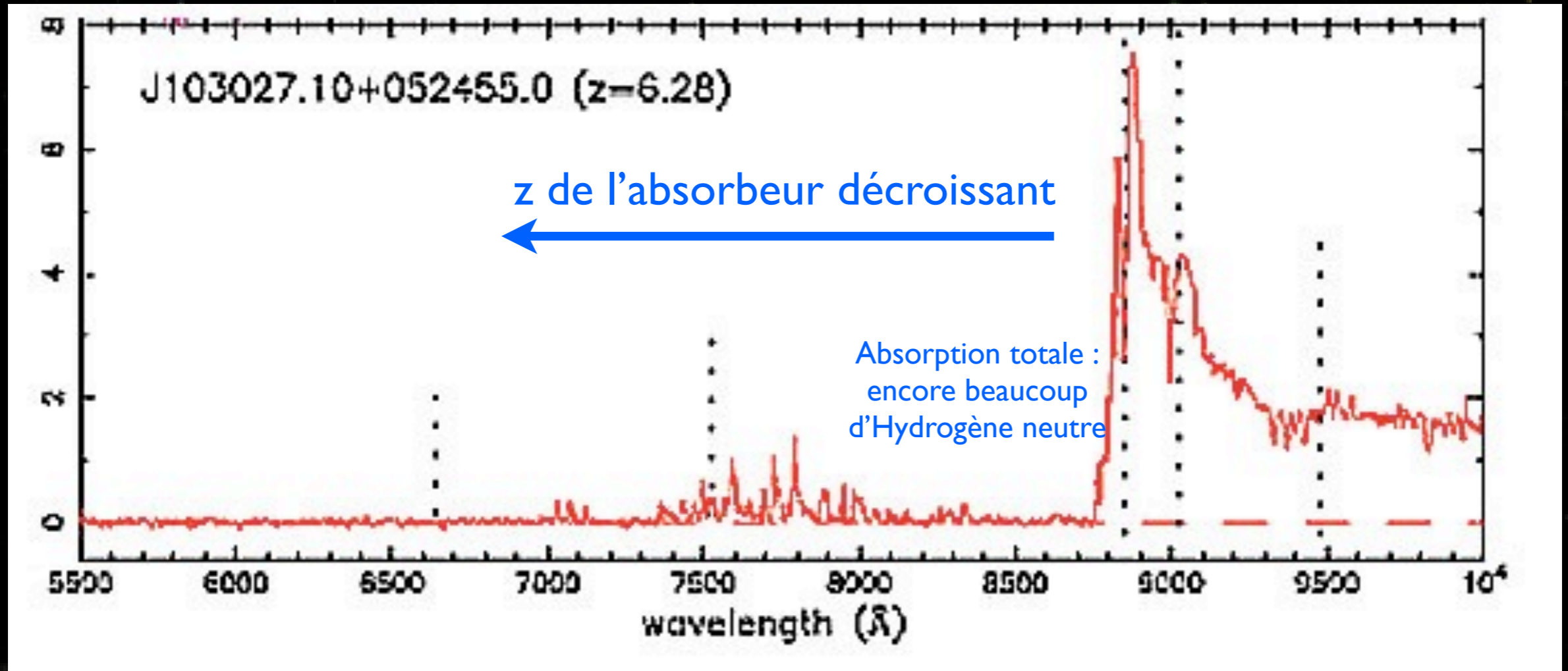
S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

J.-Ch. Hamilton - Université Paris-Diderot - DEPAES 2011



Effet Gunn-Peterson

- Spectre de quasar de découverte de l'effet (Becker et al. 2001)



↑
Raie Lyman- α
 $1215 \times (1+z) = 8820$

Intérêt des Quasars :

À part quelques raies en émission, le spectre (UV) est essentiellement continu. Tous les accidents sont donc des raies en absorption de Lyman- α le long du trajet de la lumière.



Ré-ionisation

- **Ages sombres $1000 > z > 15$:**

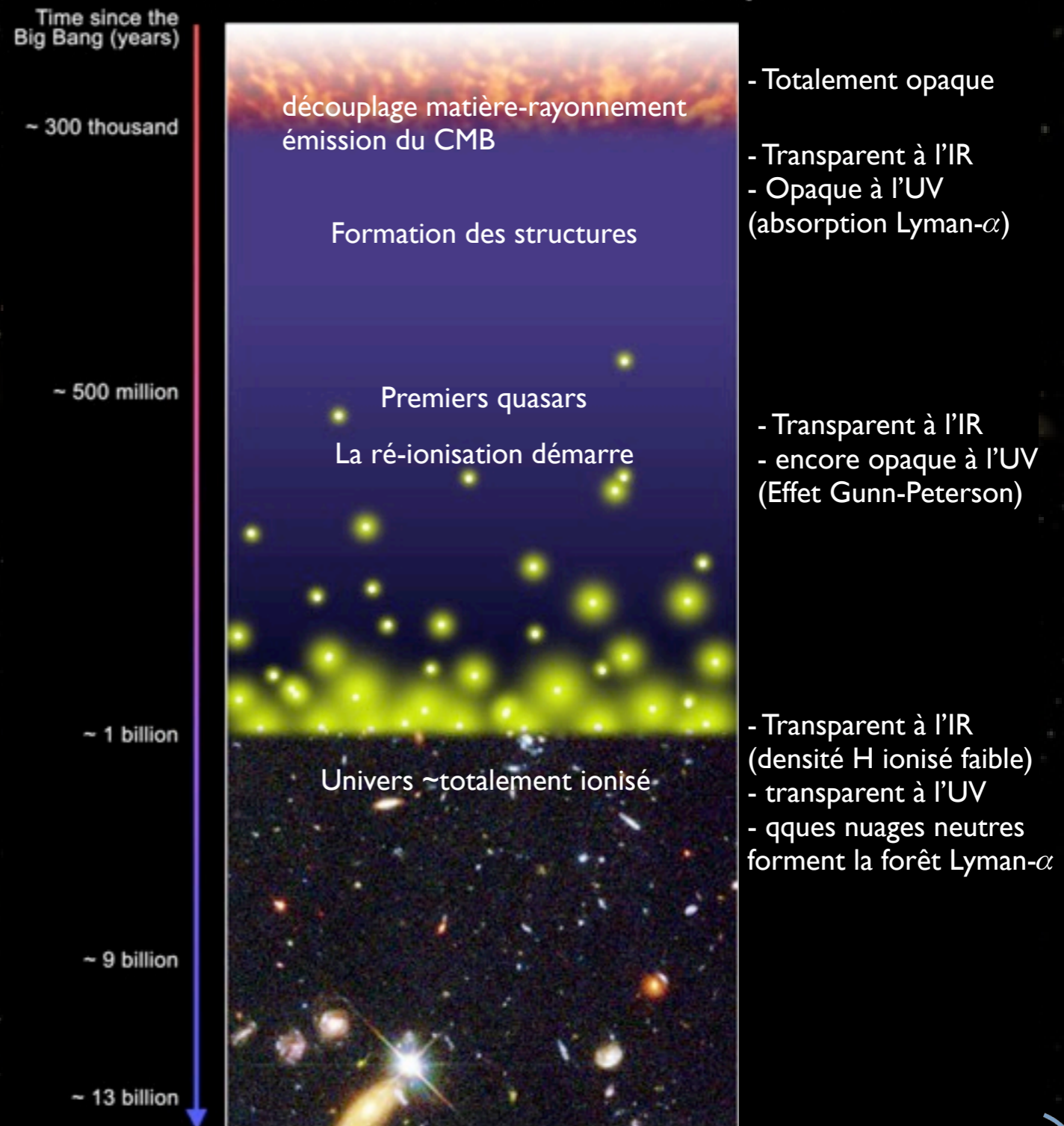
- ★ CMB + 21 cm (IR et radio)
- ★ La raie d'absorption de l'hydrogène neutre (1215 \AA - Lyman- α) absorberait tout rayonnement UV.

- **Vers $z \sim 15$: premiers quasars**

- ★ Formés par effondrement
- ★ Emission intense en UV
 - totalement absorbée par la raie Lyman- α (effet Gunn-Peterson)
- ★ Ionisation de l'hydrogène neutre environnant
 - l'hydrogène ionisé est devenu peu dense et est transparent à l'IR
 - Plus assez de H neutre: l'UV passe

What is the Reionization Era?

A Schematic Outline of the Cosmic History



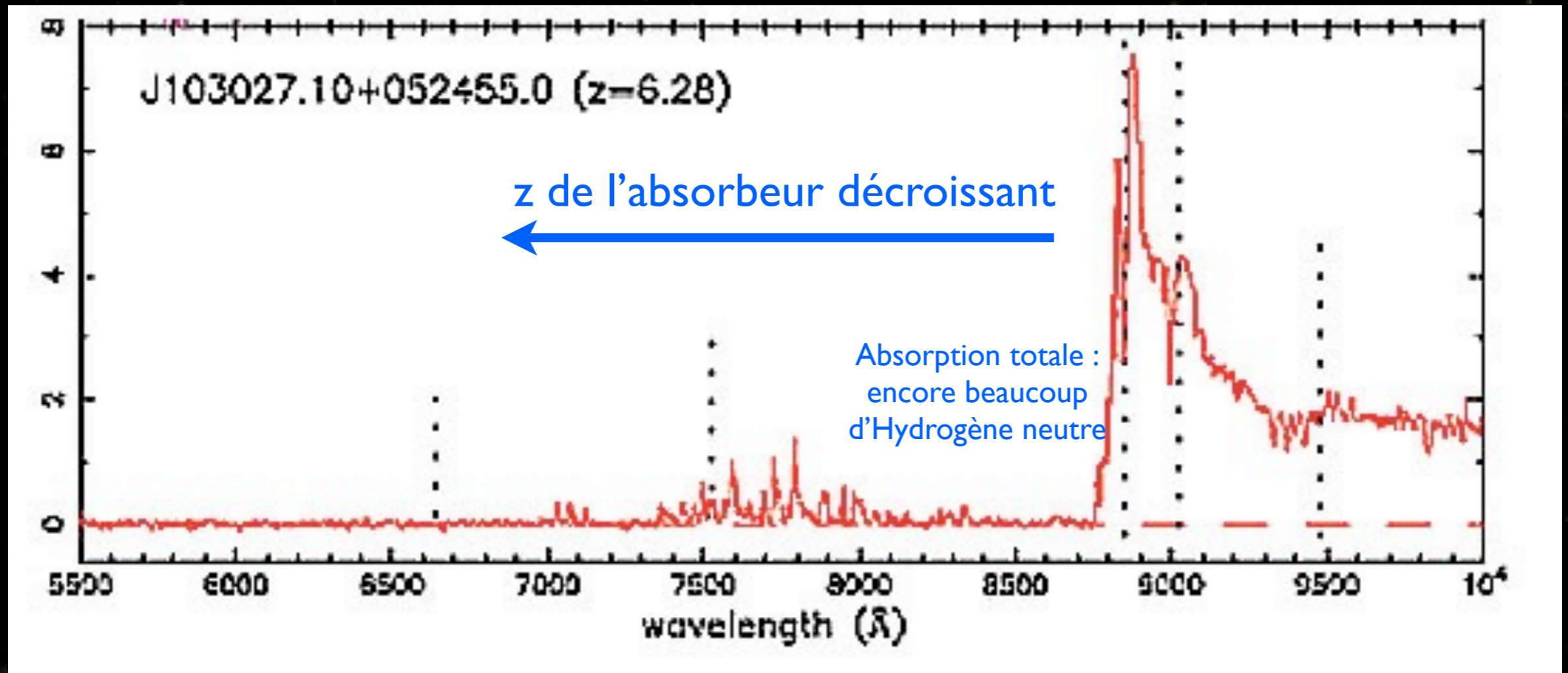
S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

J.-Ch. Hamilton - Université Paris-Diderot - DEPAES 2011



Effet Gunn-Peterson

- Spectre de découverte de l'effet (Becker et al. 2001)

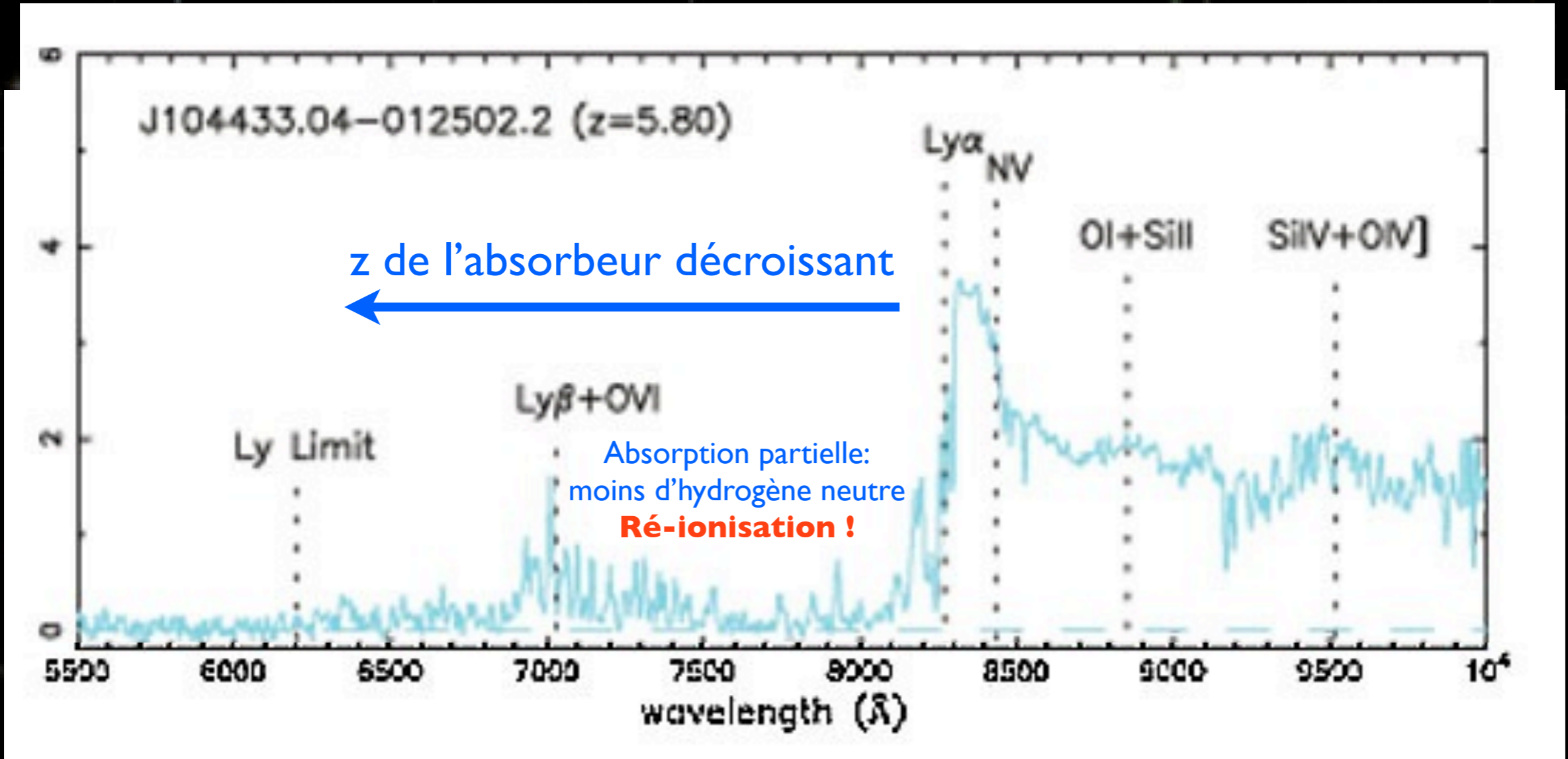


↑
Raie Lyman-a
 $1215 \times (1+z) = 8820$



Effet Gunn-Peterson

- Absorption partielle dans un quasar plus proche



↑
Raie Lyman-a
 $1215 \times (1+z) = 8260$



Ré-ionisation

- **Âges sombres $1000 > z > 15$:**

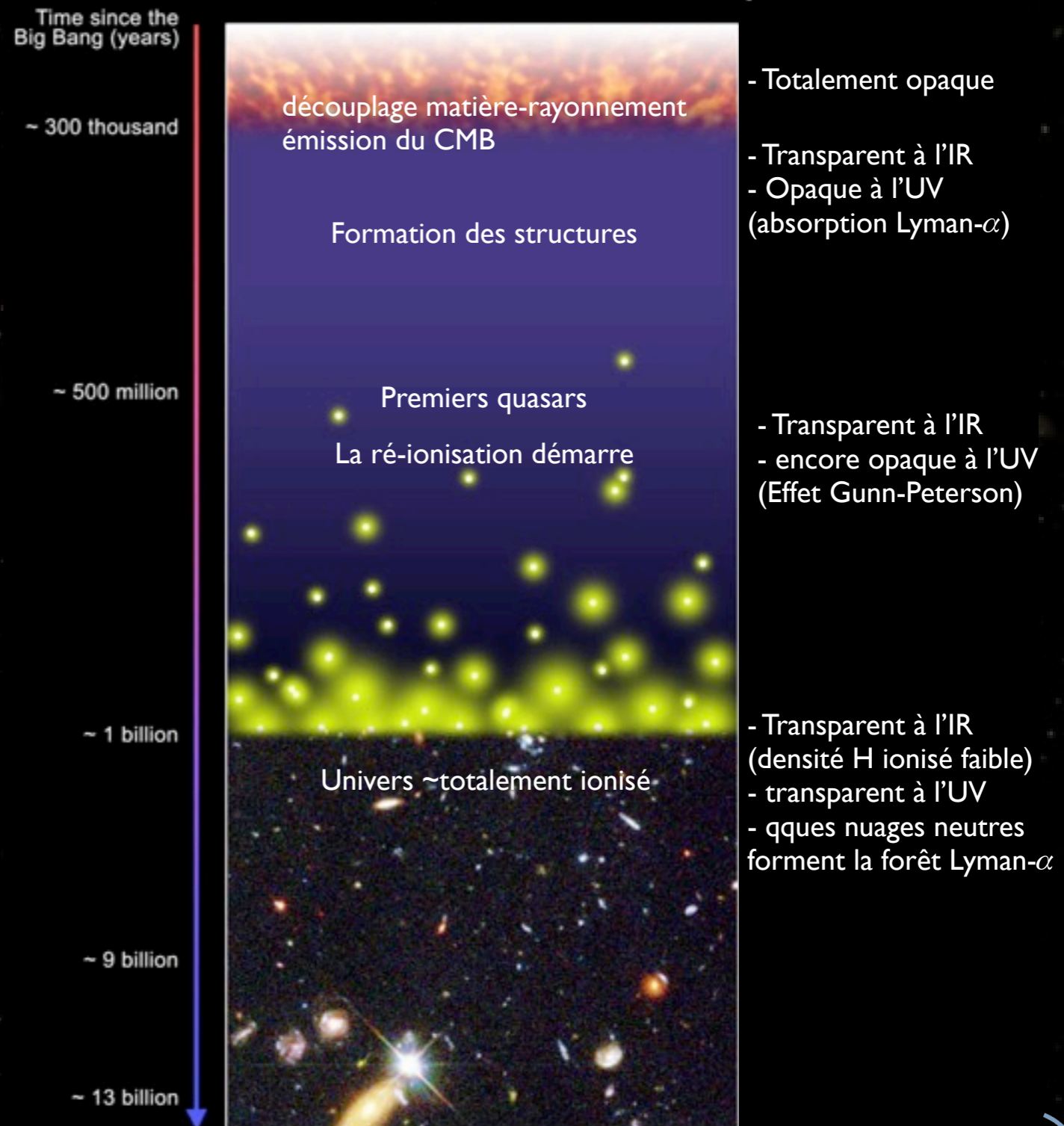
- ★ CMB + 21 cm (IR et radio)
- ★ La raie d'absorption de l'hydrogène neutre (1215 \AA - Lyman- α) absorberait tout rayonnement UV.

- **Vers $z \sim 15$: premiers quasars**

- ★ Formés par effondrement
- ★ Emission intense en UV
 - totalement absorbée par la raie Lyman- α (effet Gunn-Peterson)
- ★ Ionisation de l'hydrogène neutre environnant
 - l'hydrogène ionisé est devenu peu dense et est transparent à l'IR
 - Plus assez de H neutre: l'UV passe
- ★ à $z=6$ la re-ionisation est complète
 - le peu d'hydrogène neutre restant absorbe par raies la lumière des quasars: apparition de la forêt Lyman- α

What is the Reionization Era?

A Schematic Outline of the Cosmic History

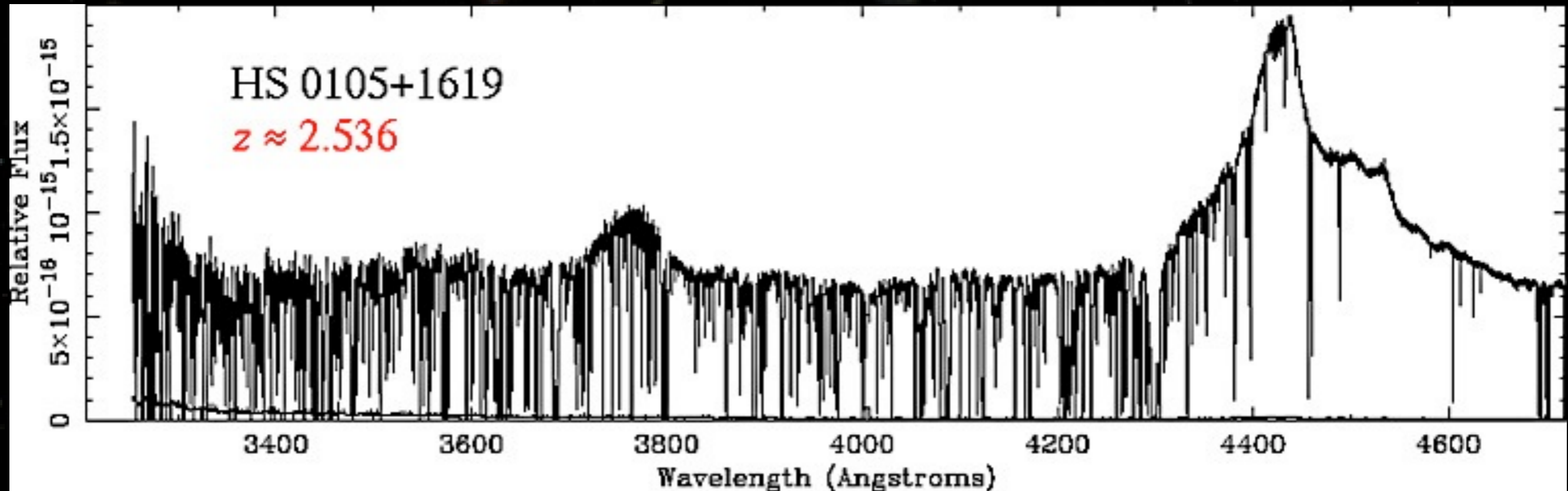


S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

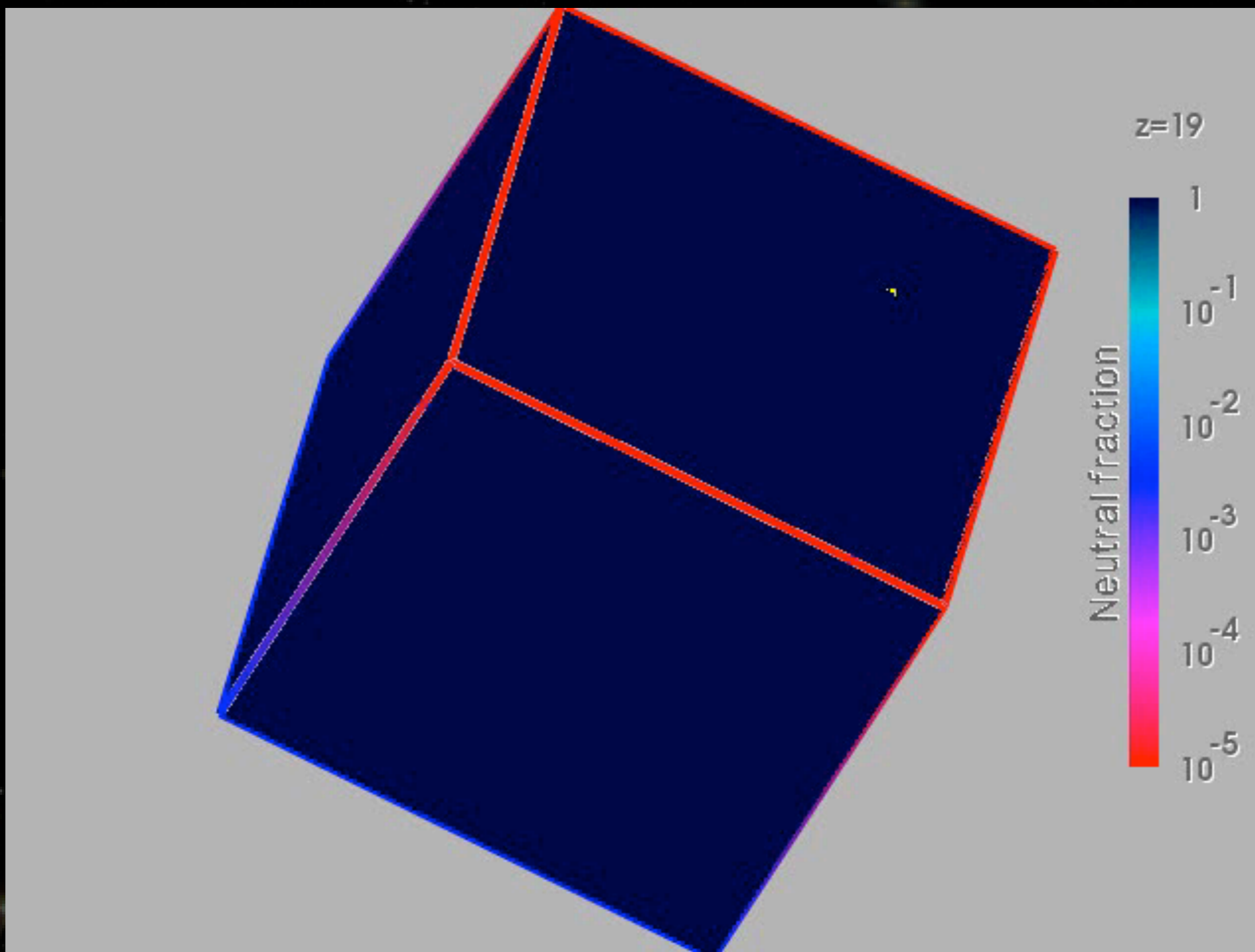
J.-Ch. Hamilton - Université Paris-Diderot - DEPAES 2011



Forêt Lyman- α



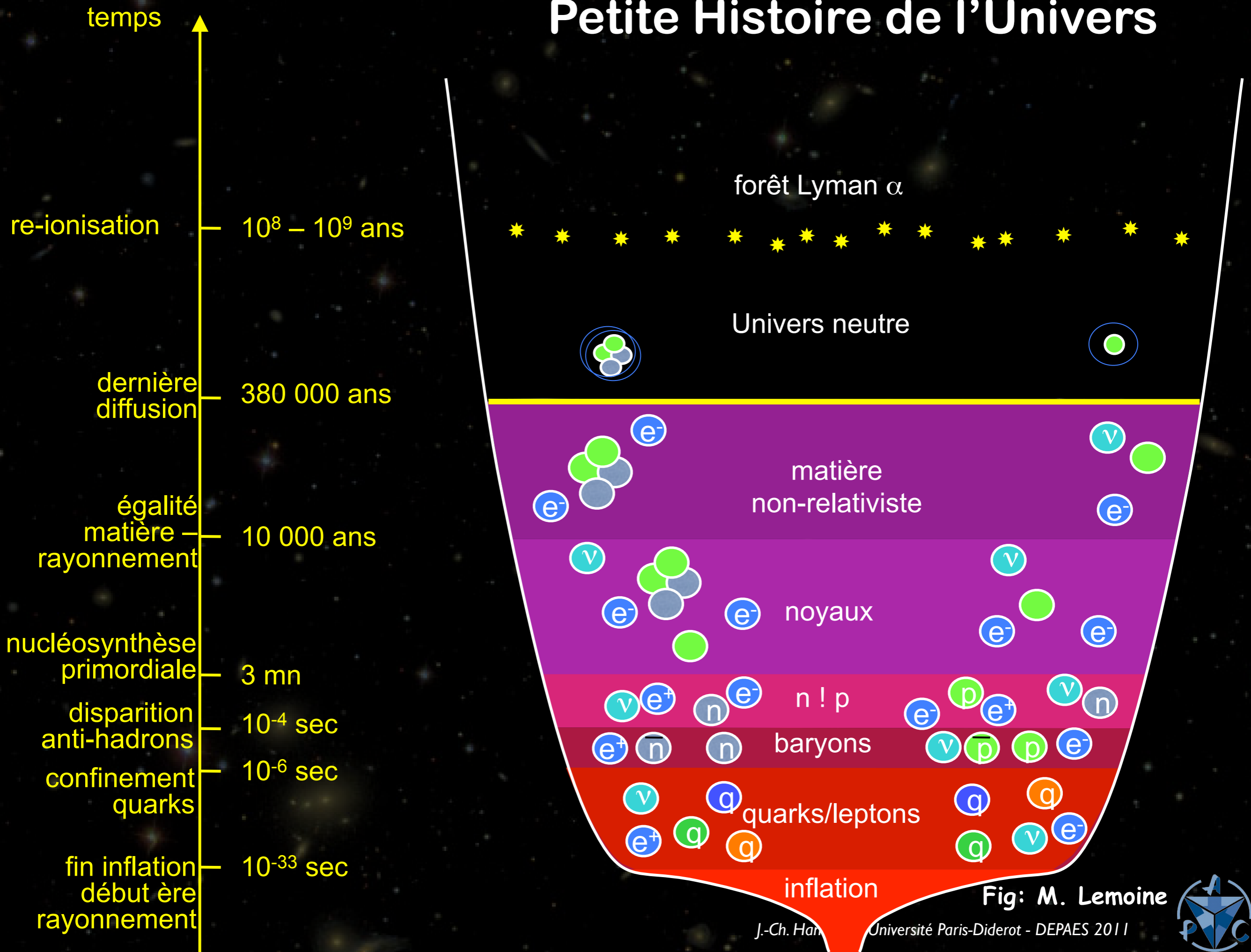
Simulation de percolation de la réionisation



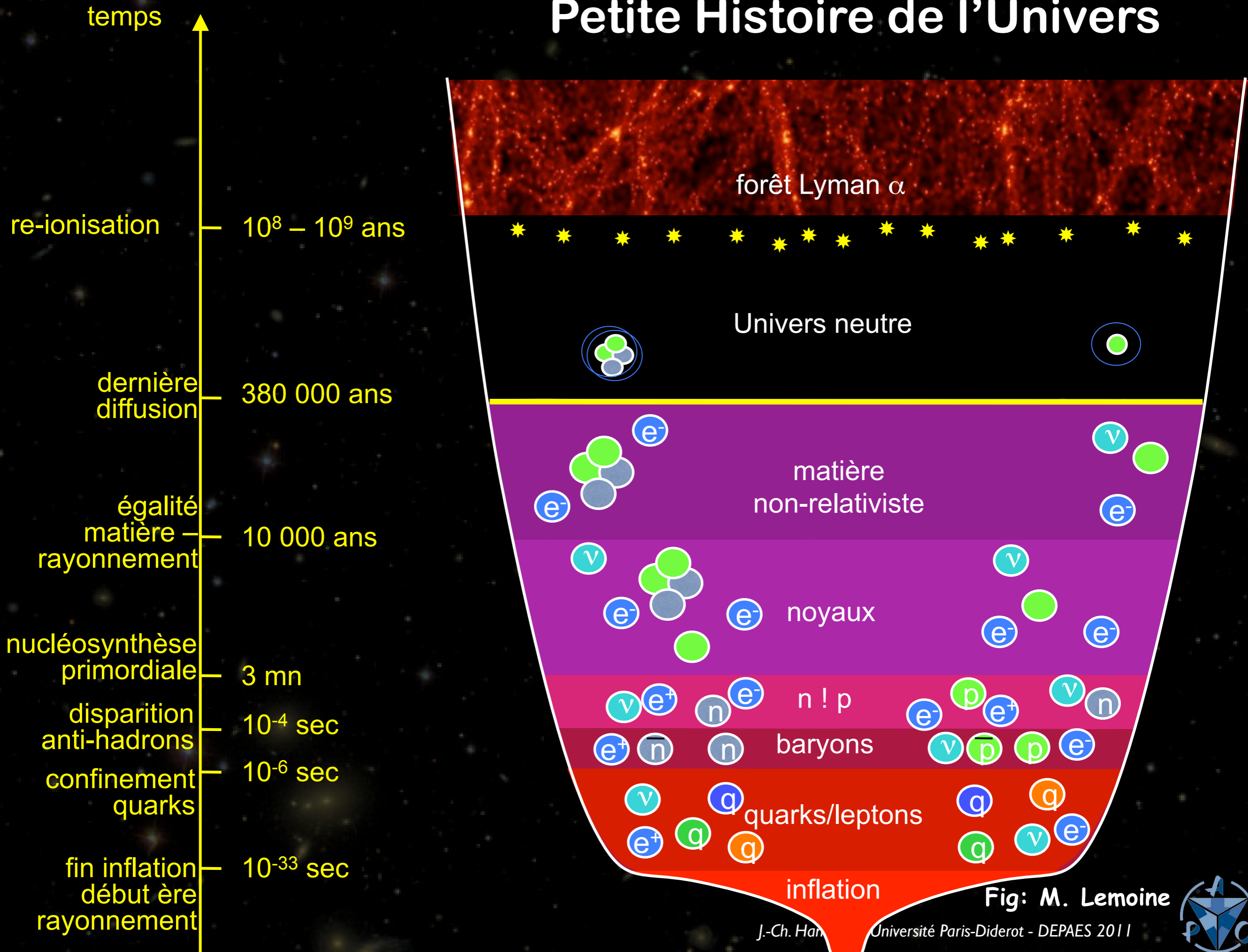
N. Gnedin



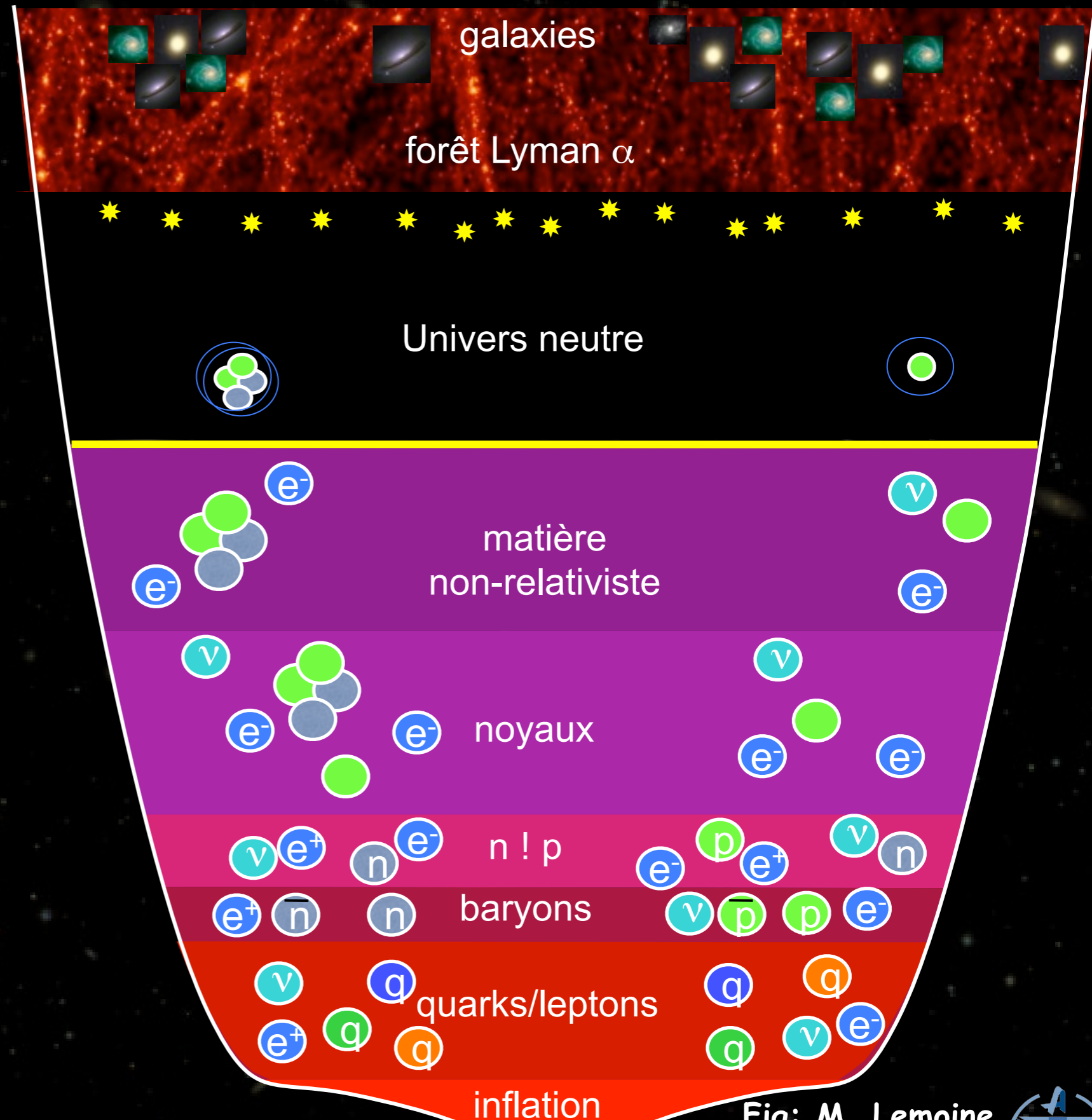
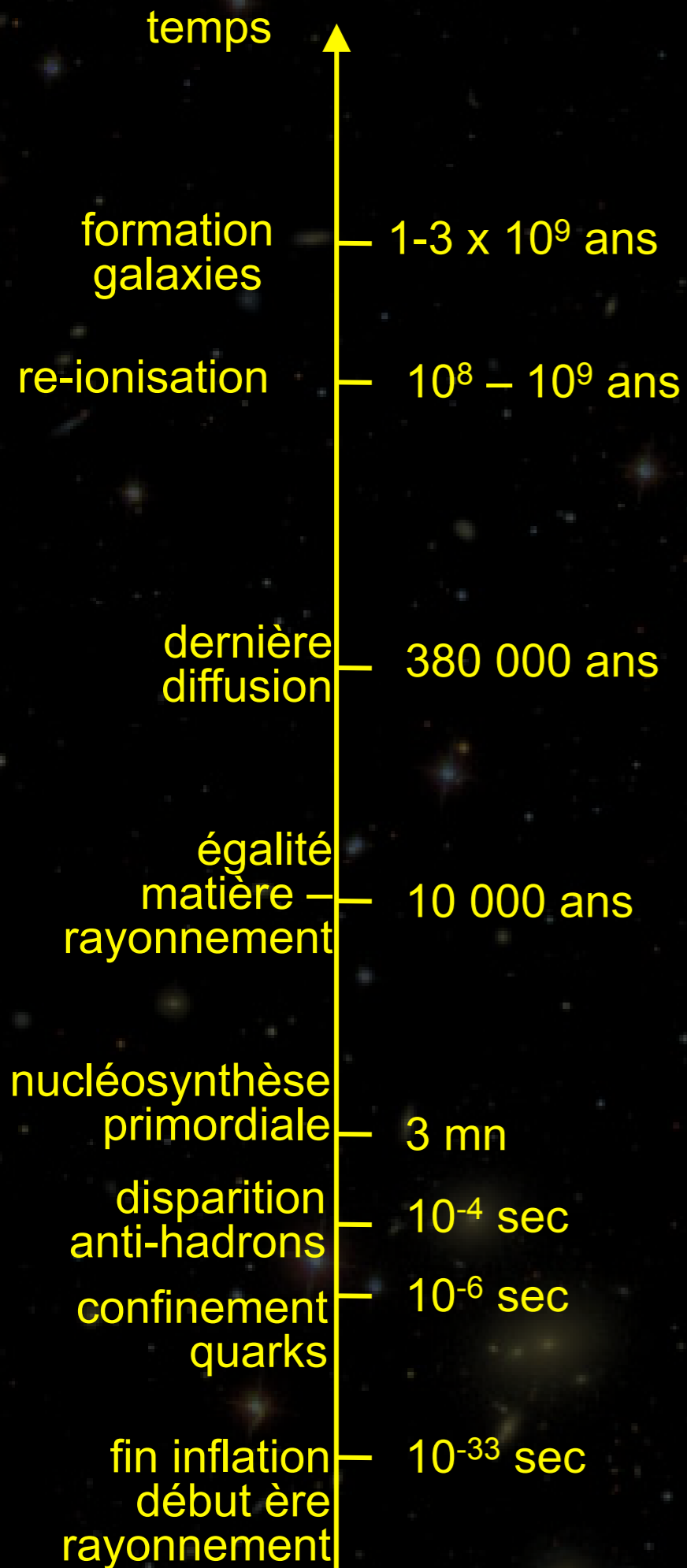
Petite Histoire de l'Univers



Petite Histoire de l'Univers



Petite Histoire de l'Univers



Petite Histoire de l'Univers

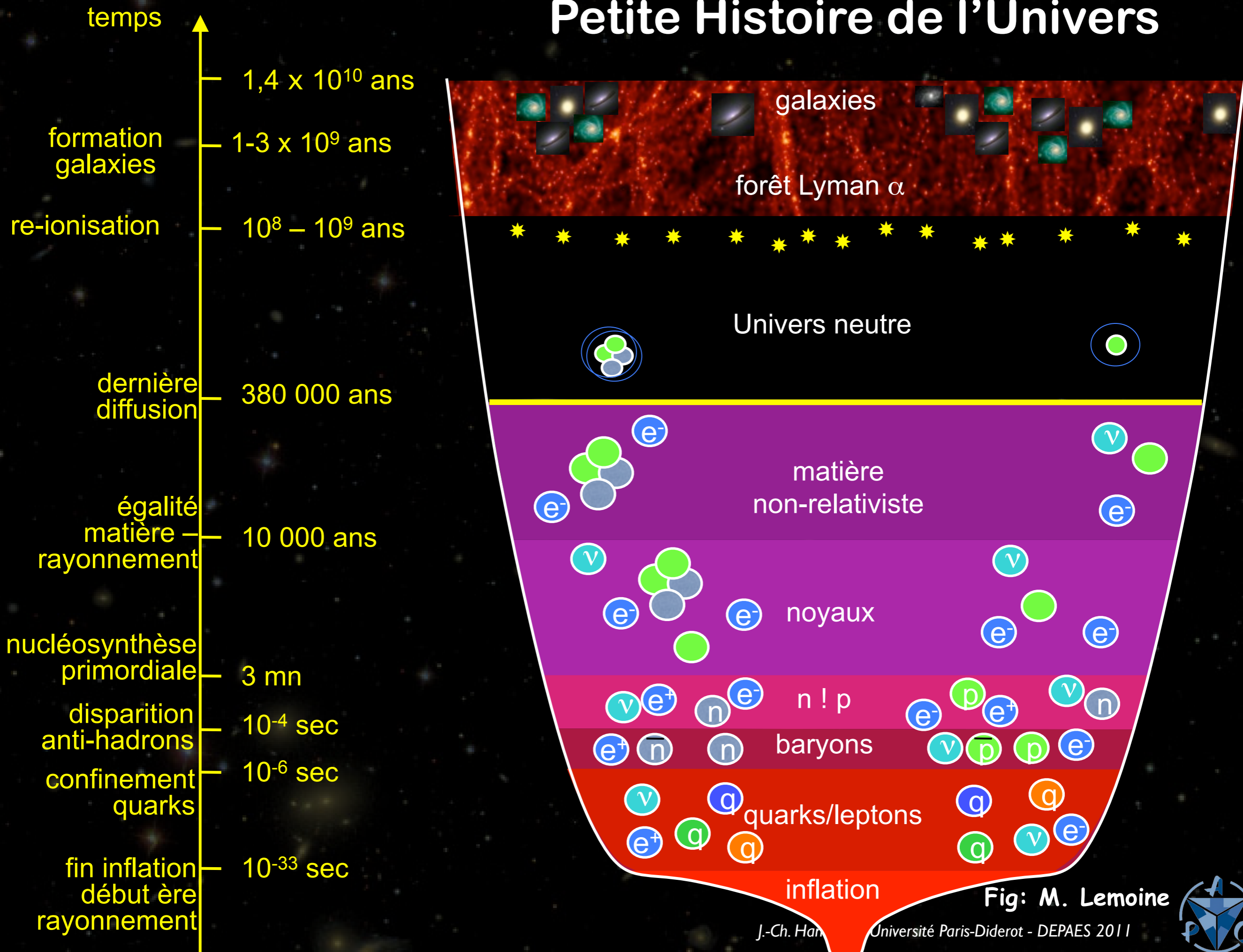


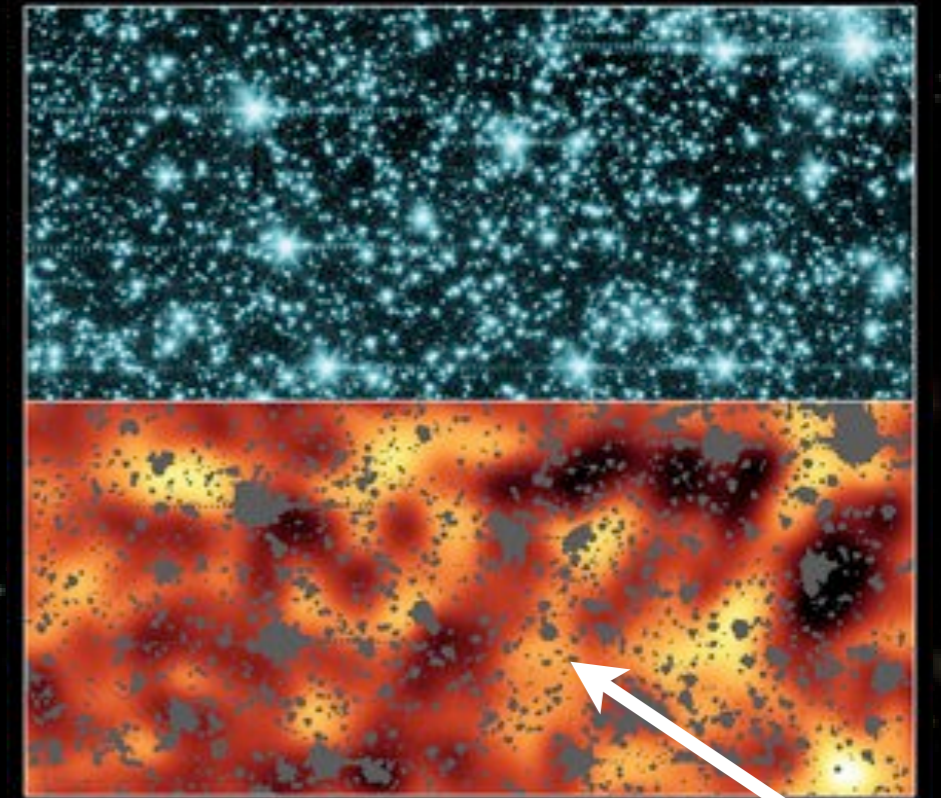
Fig: M. Lemoine



Étoiles, galaxies, supernovae ... nous ...

- Étoiles de population III

- ★ Sans éléments lourds (uniquement ce qu'a produit BBN)
- ★ Très massives $\sim 100 M_{\odot}$?
- ★ Encore très mal comprises ...
 - le fonctionnement des étoiles nécessite le cycle CNO, impossible avec les pop. III
- ★ Traces ?
 - galaxies faibles bleues ?
 - Fond diffus IR de Spitzer ?



Spitzer (NASA)

Pop. III ?

- Galaxies

- ★ Formation des galaxies \sim entre 10 Gyr et aujourd'hui (pas encore terminée)

- Supernovae, étoiles de population II et I

- ★ Enrichissement en éléments lourds
- ★ Formation du système solaire ~ 8 Gyr



Galaxie en formation dans l'Univers jeune (HST/NASA)



Plan du cours

● Cours II

★ L'Univers de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

- Métrique FLRW
- Redshift, taux d'expansion
- Équations de Friedman
- Densités des espèces composant l'Univers
- Expansion lors de diverses ères
- Quelques mots sur le «Big Bang» ...

★ F.A.Q. de cosmologie

★ Histoire «thermique» de l'Univers

- Transitions de phase
- Nucléosynthèse primordiale
- Égalité matière-rayonnement
- Découplage matière-rayonnement
- Pic acoustique des baryons
- Formation des structures
- Ré-ionisation
- premières étoiles, galaxies, supernovae ...

★ Matière noire



Matière noire

- Pourquoi ?

- ★ Dynamique des amas
- ★ Courbes de rotation des galaxies
- ★ Formation des structures et fond diffus

- Quels candidats ?

- ★ Objets compacts
- ★ Particules «exotiques»
- ★ Modification de la gravité



Dynamique des amas

- Fritz Zwicky (1933)

- ★ Amas de Coma

- 2000 galaxies
- vitesse ~ 300 km/s
- rayon \sim qques Mpc

- ★ Mesure des vitesses

→ Énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

- ★ Mesure des distances entre galaxies

→ Énergie potentielle $E_p = -G\frac{m^2}{r}$

- ★ Équilibre dynamique (Viriel)

$$E_p = -2E_c$$

- ★ Estimation de la masse

$$m \propto r \times v^2$$

→ 100 à 500 fois la masse stellaire

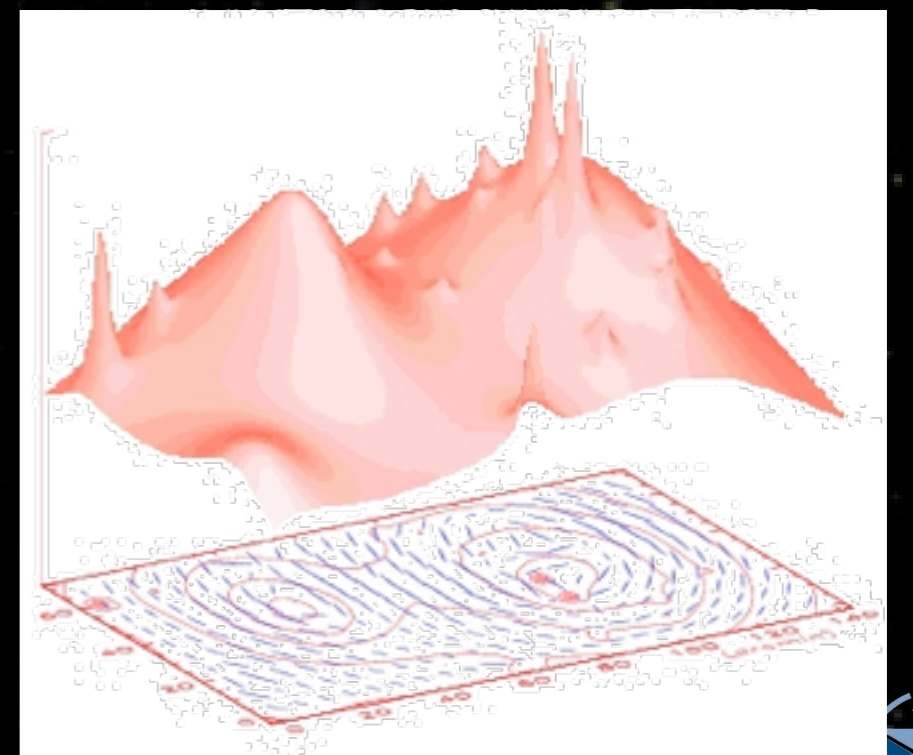
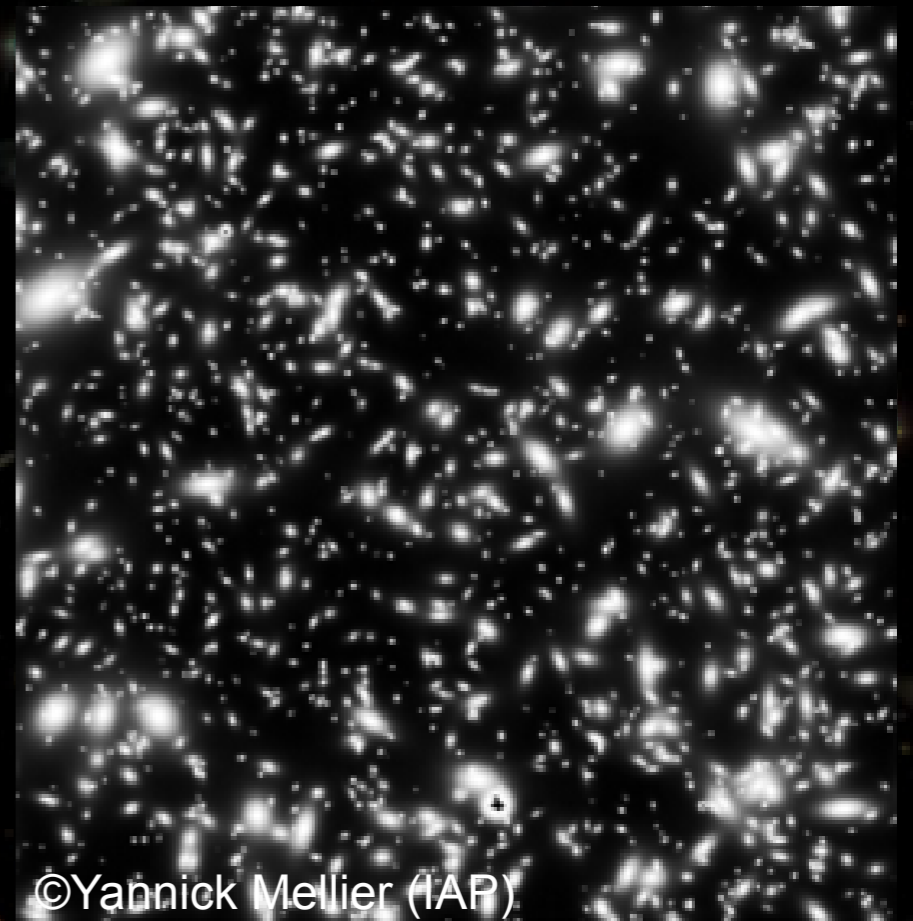


Matière
noire !



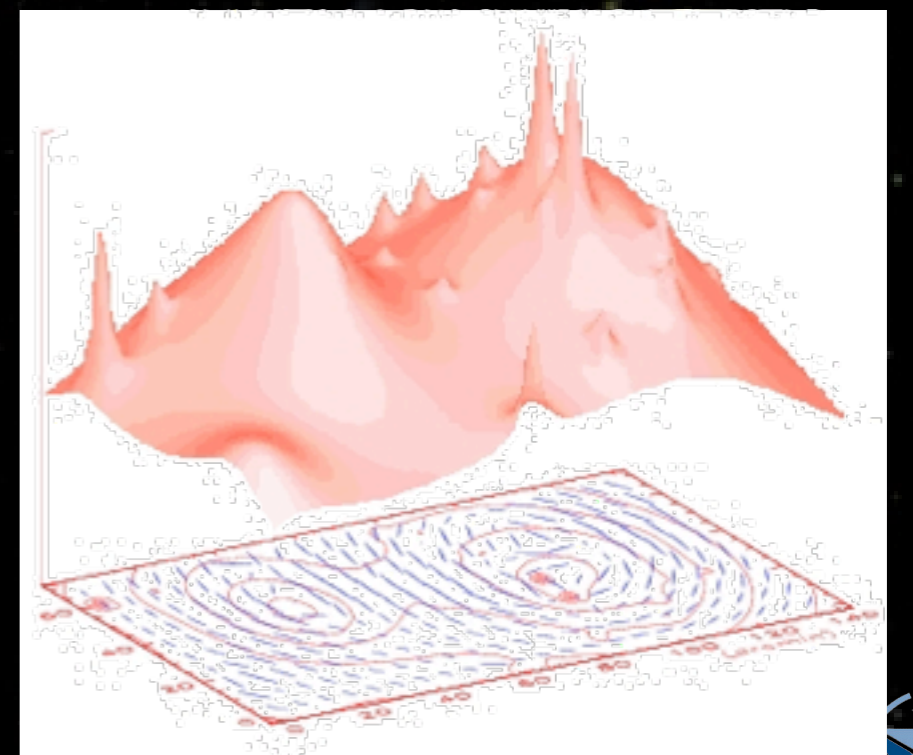
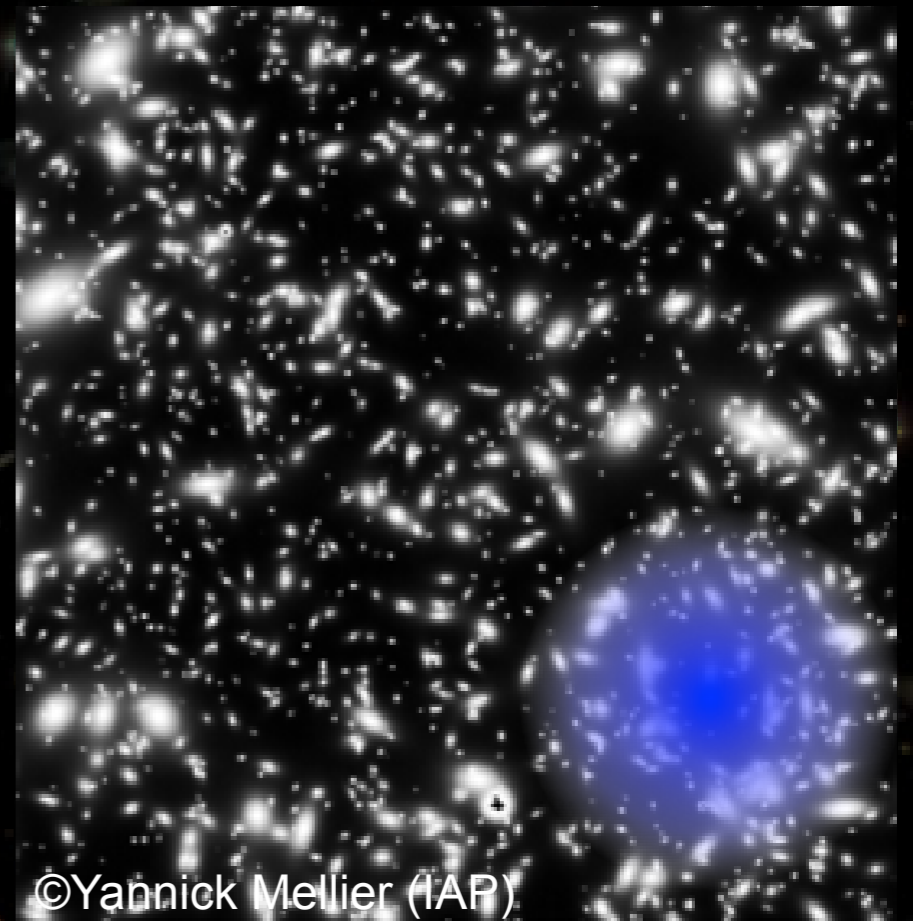
Lentillage gravitationnel

- La masse courbe l'espace-temps
 - ★ Le trajet des photons est défléchi par la masse
- Un amas très massif va déformer les images des objets d'arrière-plan
 - ★ Mirages gravitationnels (arcs, images multiples)
 - ★ Lentillage faible : déformation légère des galaxies d'arrière plan
 - Ellipticité et orientations systématiques
- Possibilité de reconstruire le potentiel gravitationnel de l'amas



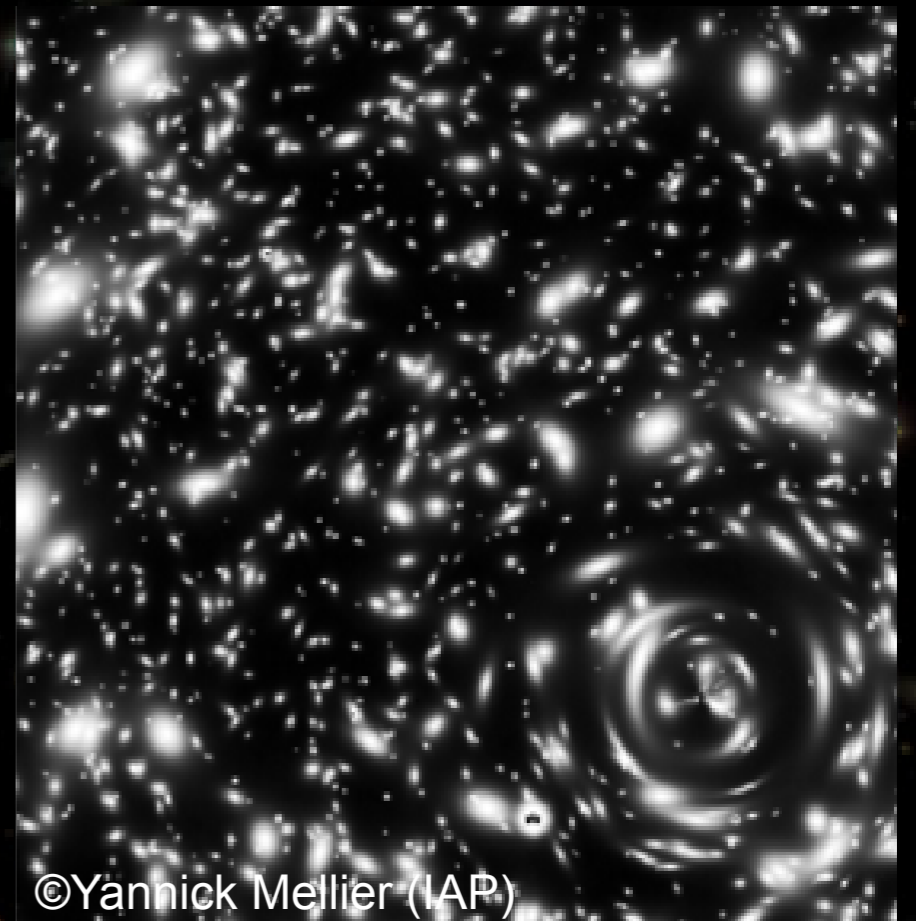
Lentillage gravitationnel

- La masse courbe l'espace-temps
 - ★ Le trajet des photons est défléchi par la masse
- Un amas très massif va déformer les images des objets d'arrière-plan
 - ★ Mirages gravitationnels (arcs, images multiples)
 - ★ Lentillage faible : déformation légère des galaxies d'arrière plan
 - Ellipticité et orientations systématiques
- Possibilité de reconstruire le potentiel gravitationnel de l'amas

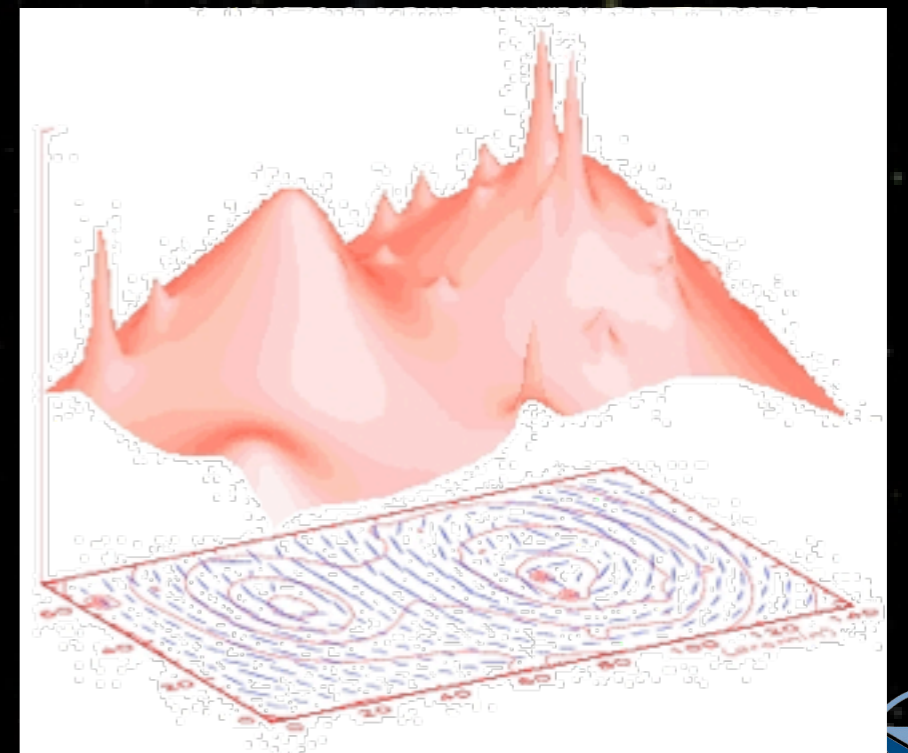


Lentillage gravitationnel

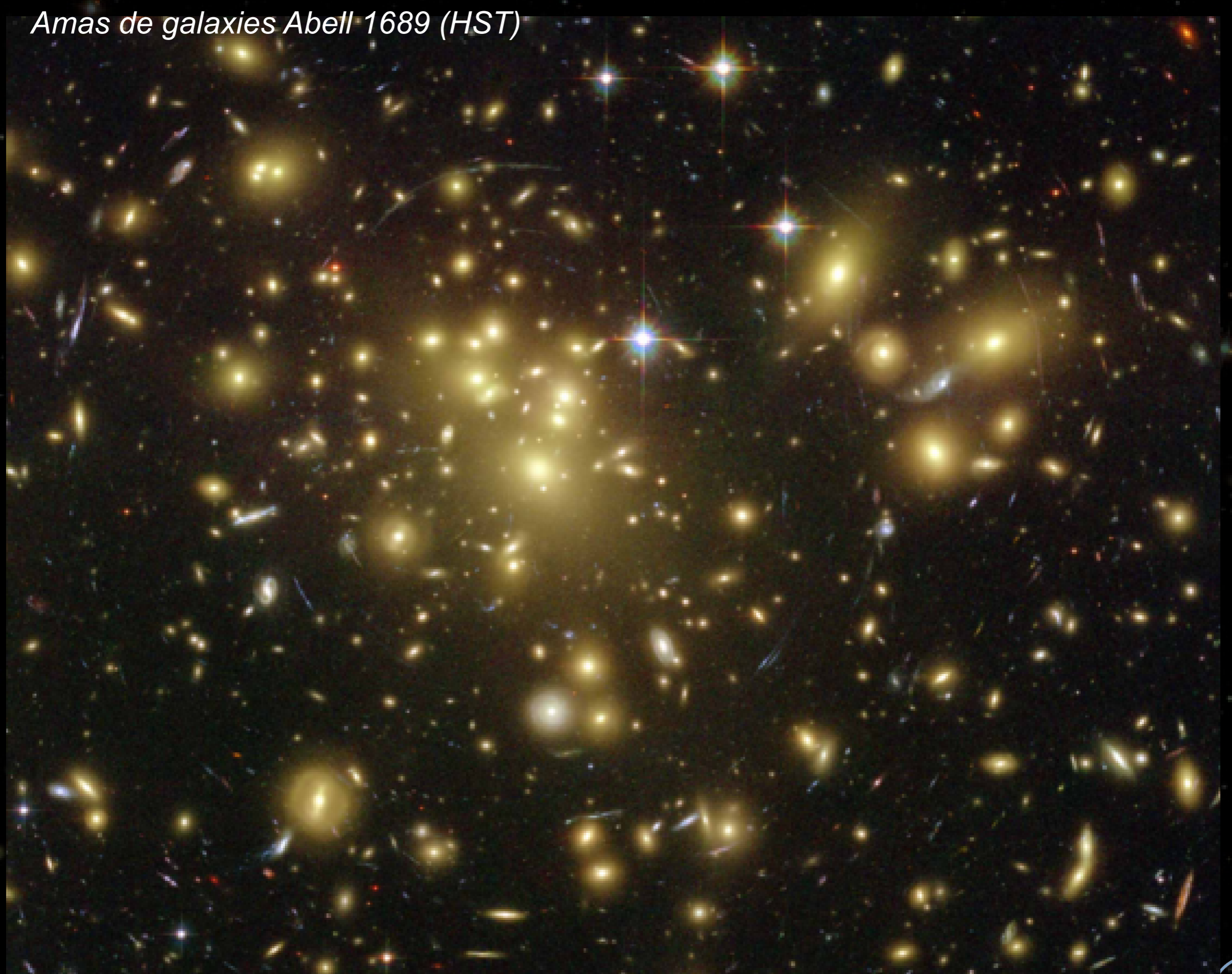
- La masse courbe l'espace-temps
 - ★ Le trajet des photons est défléchi par la masse
- Un amas très massif va déformer les images des objets d'arrière-plan
 - ★ Mirages gravitationnels (arcs, images multiples)
 - ★ Lentillage faible : déformation légère des galaxies d'arrière plan
 - Ellipticité et orientations systématiques
- Possibilité de reconstruire le potentiel gravitationnel de l'amas



©Yannick Mellier (IAP)



Amas de galaxies Abell 1689 (HST)



Reconstruction du potentiel gravitationnel

Mauve : masse noire reconstruite
par lentillage faible



Résultat : matière noire systématiquement majoritaire !

Emission X des amas

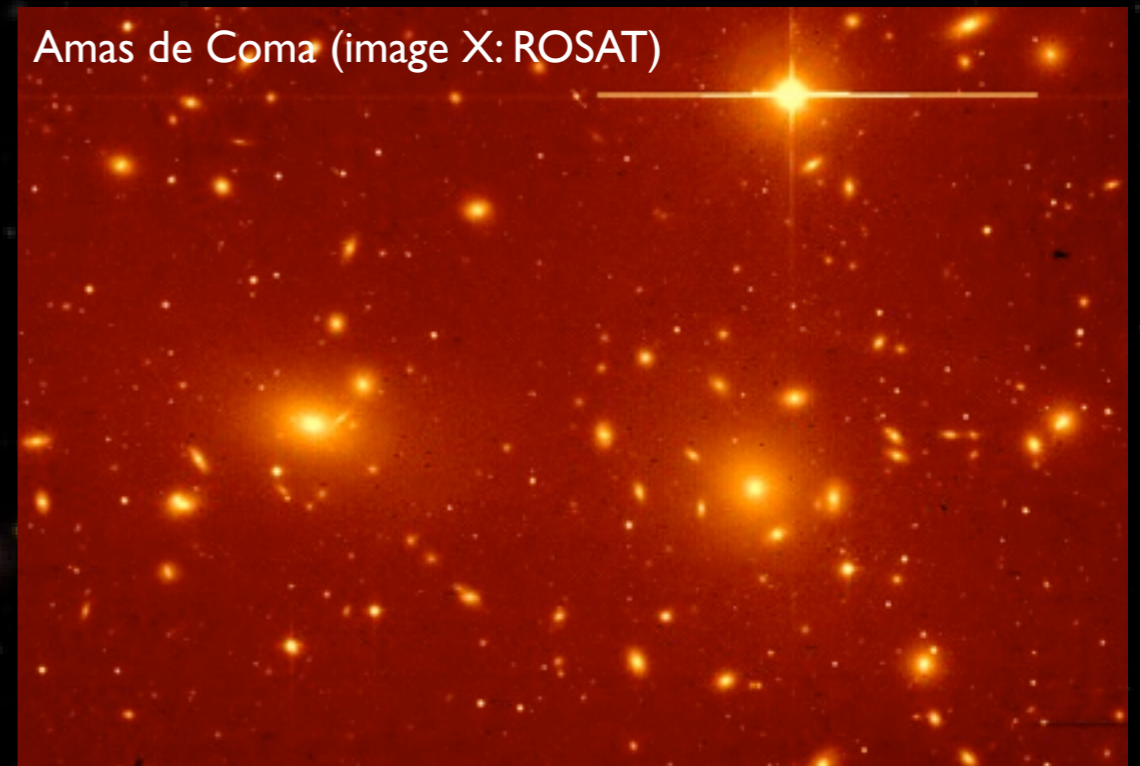
- Plus récent (80's)
- La matière visible s'étend beaucoup plus loin que les étoiles
- Gaz chaud ($\sim 10^7 - 10^8$ K)
 - ★ à l'équilibre hydrostatique dans le champ gravitationnel
 - ★ On peut déterminer la masse totale
- Gaz \sim le double de la matière visible en masse
- Il faut de la matière noire (~ 85 %) pour chauffer suffisamment le gaz !

Amas Abell 2029



Image optique SDSS

Amas de Coma (image X: ROSAT)



Emission X des amas

- Plus récent (80's)
- La matière visible s'étend beaucoup plus loin que les étoiles
- Gaz chaud ($\sim 10^7 - 10^8$ K)
 - ★ à l'équilibre hydrostatique dans le champ gravitationnel
 - ★ On peut déterminer la masse totale
- Gaz \sim le double de la matière visible en masse
- Il faut de la matière noire ($\sim 85\%$) pour chauffer suffisamment le gaz !

Amas Abell 2029

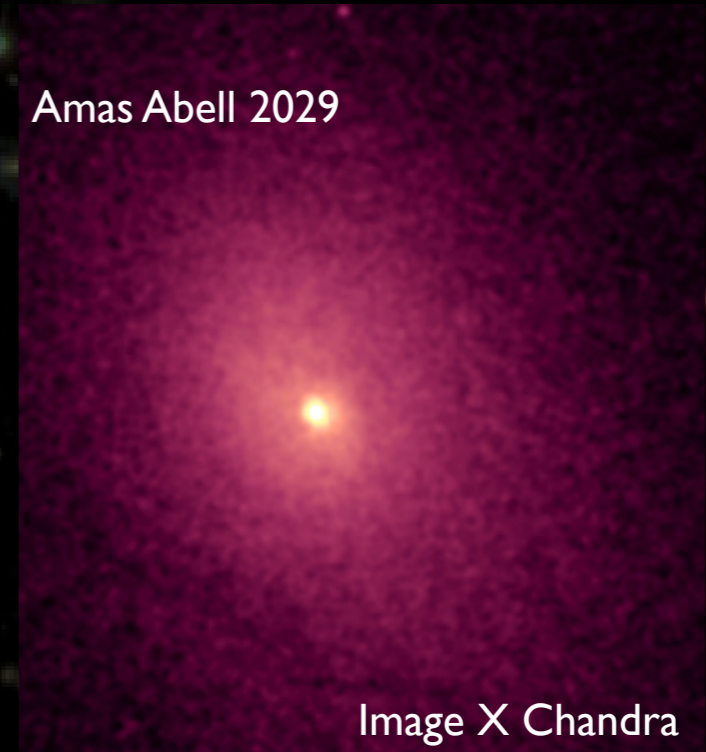
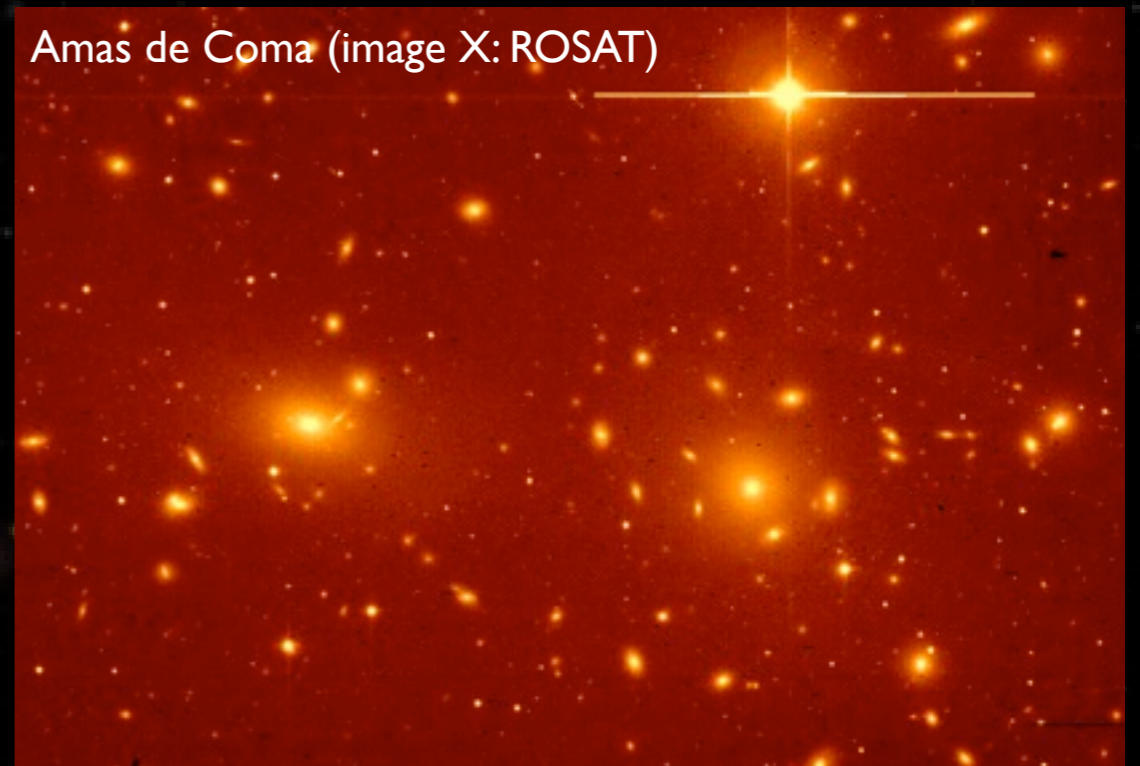


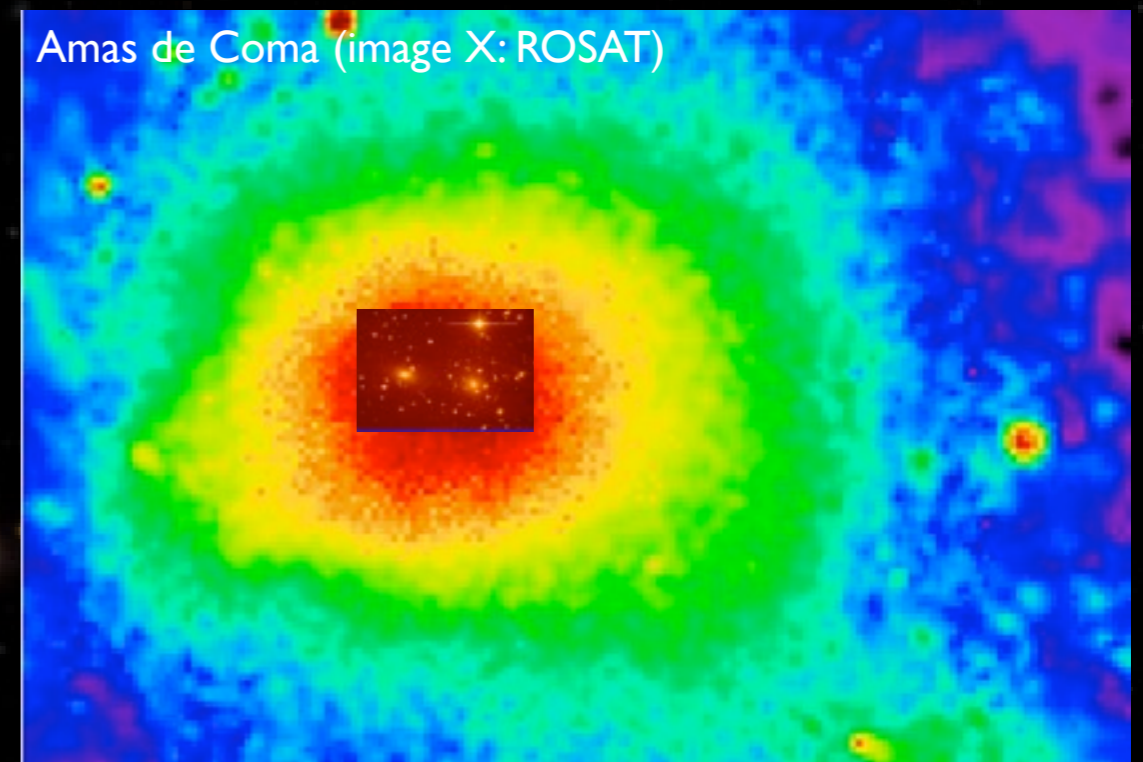
Image X Chandra

Amas de Coma (image X: ROSAT)



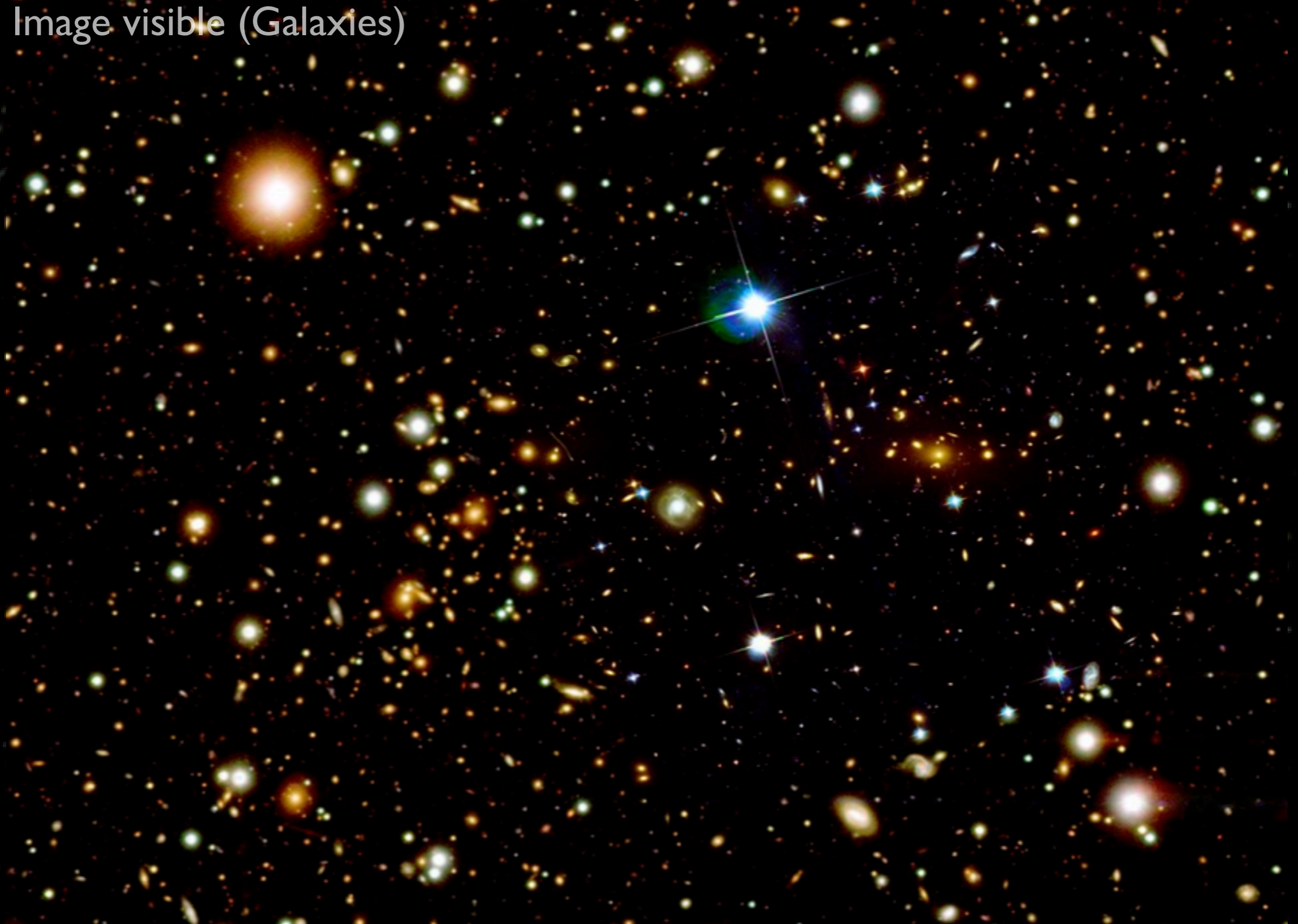
Emission X des amas

- Plus récent (80's)
- La matière visible s'étend beaucoup plus loin que les étoiles
- Gaz chaud ($\sim 10^7 - 10^8$ K)
 - ★ à l'équilibre hydrostatique dans le champ gravitationnel
 - ★ On peut déterminer la masse totale
- Gaz \sim le double de la matière visible en masse
- Il faut de la matière noire ($\sim 85\%$) pour chauffer suffisamment le gaz !



La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)

Image visible (Galaxies)



La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)



Image X (gaz) - Chandra



La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)

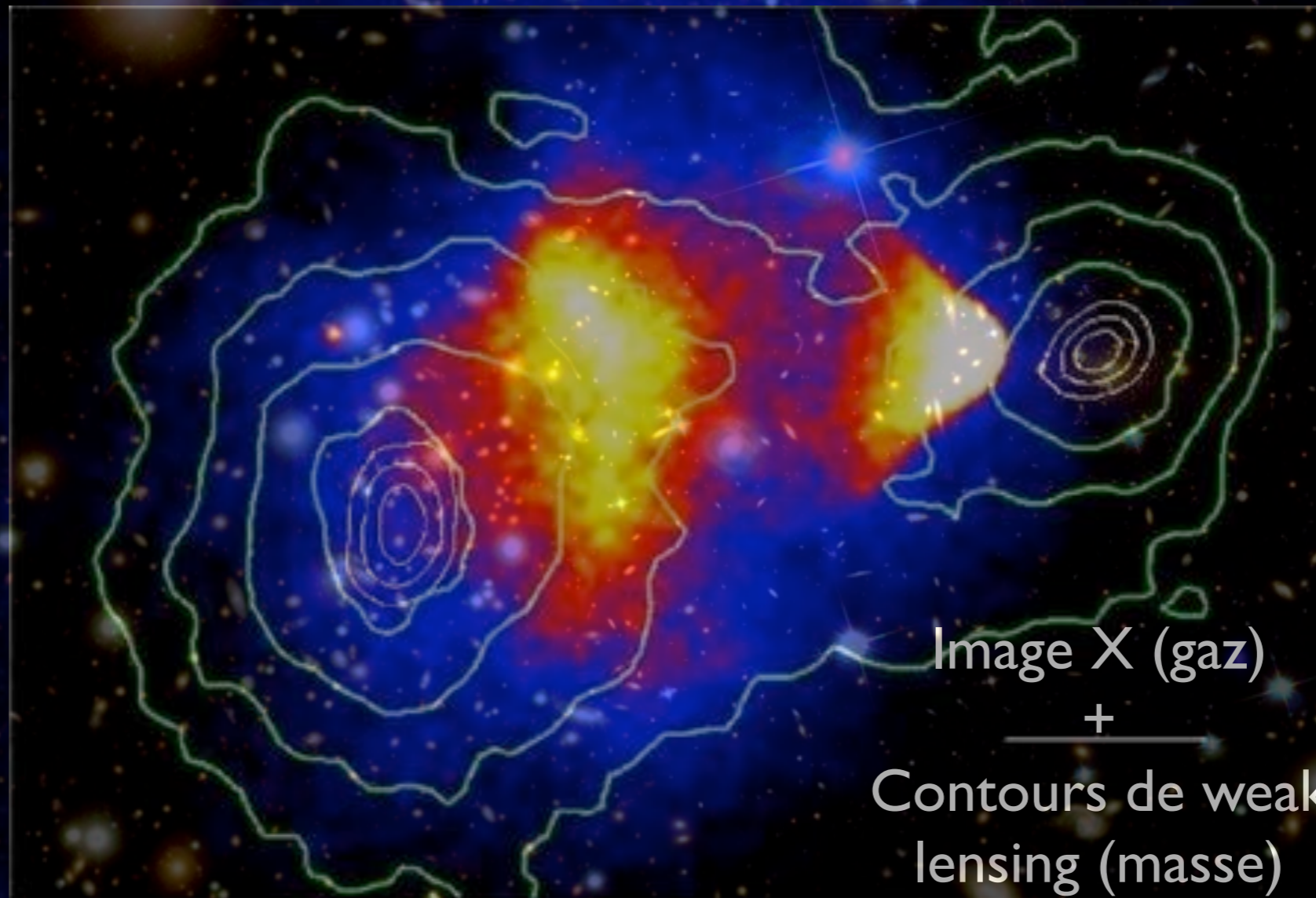


Image X (gaz) - Chandra



La «preuve» : le «Bullet Cluster» (2006)

Visible : Galaxies

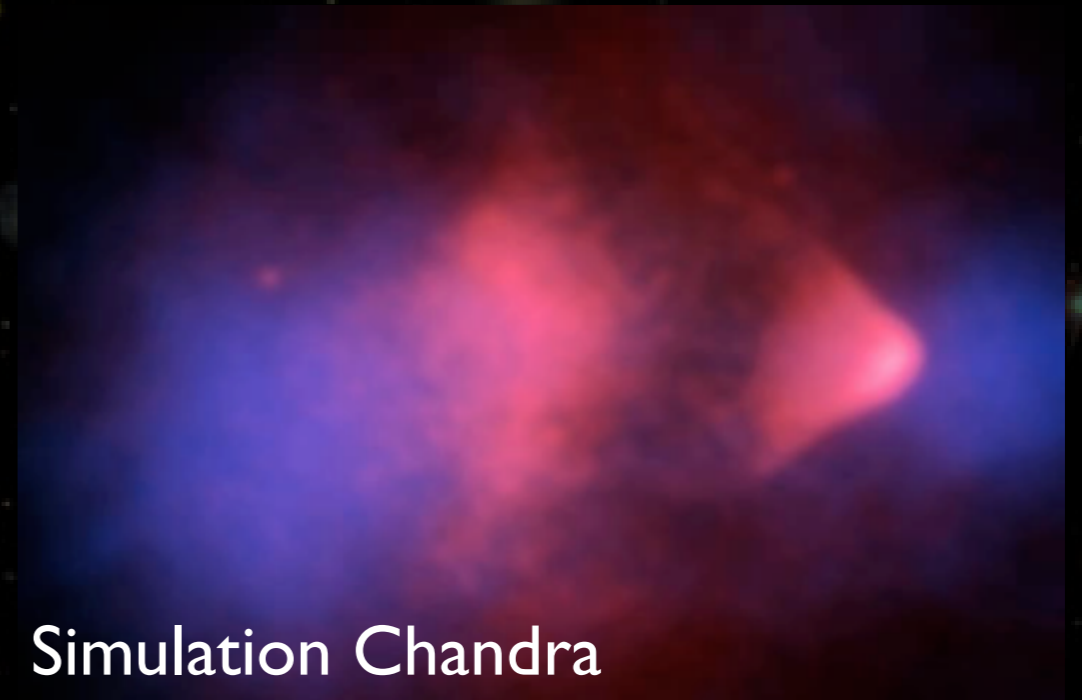
X : Gaz

Lensing : masse

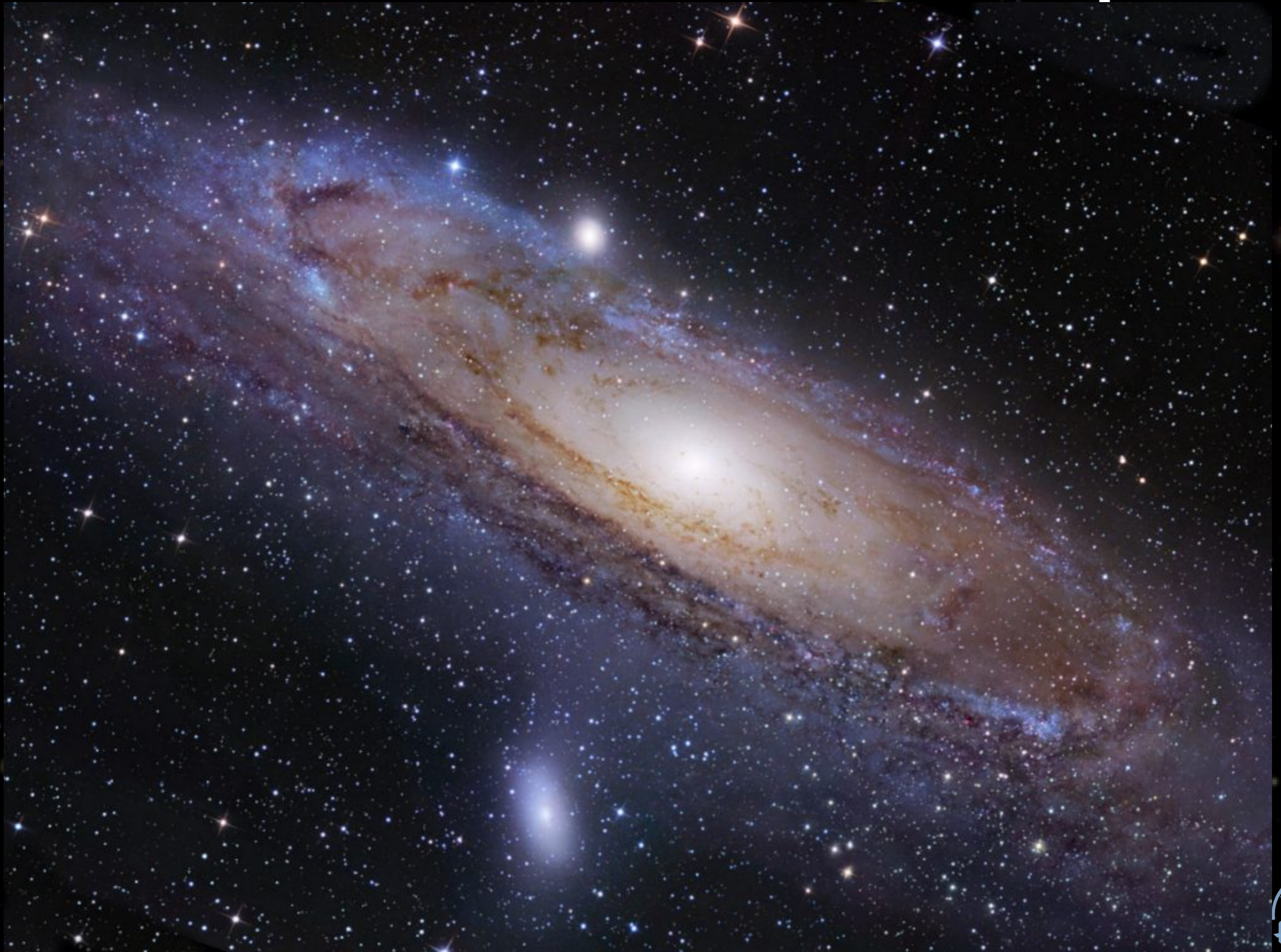


«Bullet Cluster»

- collision de deux amas
- Les galaxies et la matière noire sont non collisionnelles
 - ★ Elles passent «sans se voir»
- Le gaz est collisionnel
 - ★ Il reste au centre, s'échauffe et des ondes de choc apparaissent
- C'est l'argument le plus fort en faveur de la matière noire



Matière noire Galactique



Matière noire Galactique

Vitesse de rotation typique
des étoiles : 200 km/s

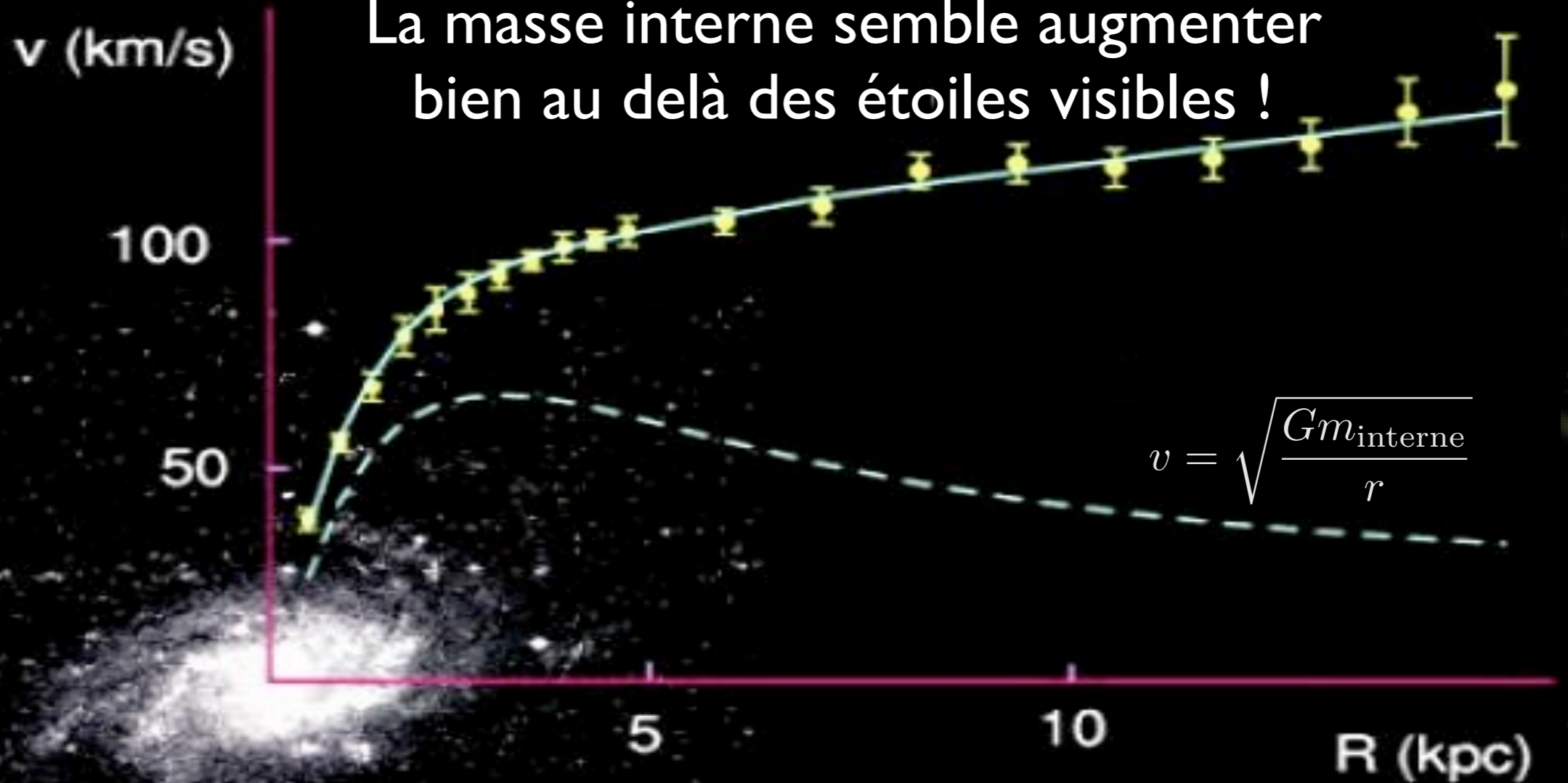


Le profil de vitesse permet
de reconstruire la masse !

$$v = \sqrt{\frac{Gm_{\text{interne}}}{r}}$$

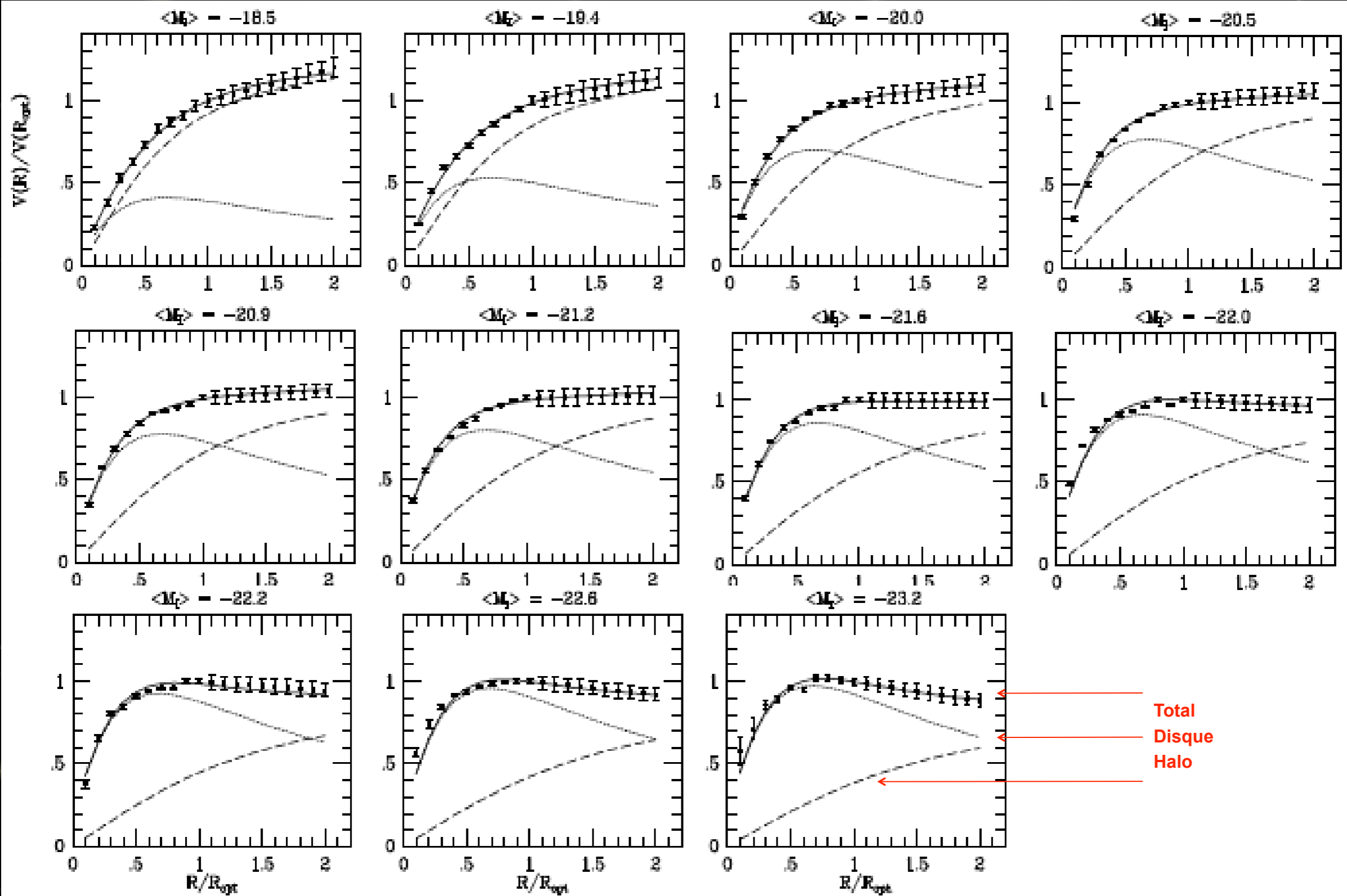


La masse interne semble augmenter bien au delà des étoiles visibles !



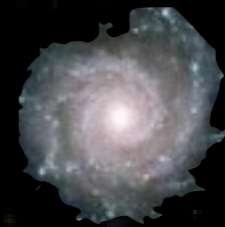
M33





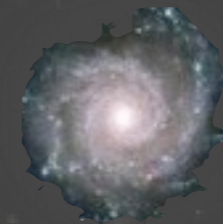
Halo de matière noire

- La masse d'une galaxie s'étend bien plus loin que sa masse stellaire visible
- Il existe un halo de matière noire autour
 - ★ Jusqu'à ~ 200 kpc
 - ★ rapport Masse/Luminosité ~ 200



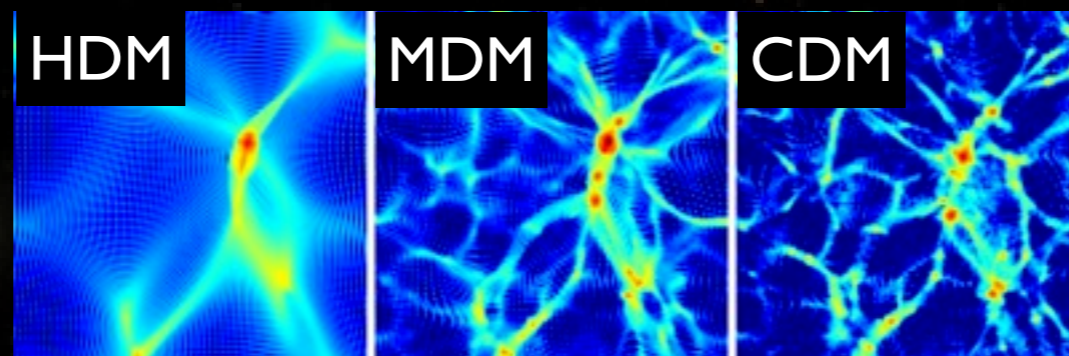
Halo de matière noire

- La masse d'une galaxie s'étend bien plus loin que sa masse stellaire visible
- Il existe un halo de matière noire autour
 - ★ Jusqu'à ~ 200 kpc
 - ★ rapport Masse/Luminosité ~ 200



Formation des structures et matière noire

- Les anisotropies initiales sont très faibles
 - ★ Fond diffus cosmologique : 3 K et fluctuations $\sim 30 \mu\text{K}$
 - ★ Fluctuations primordiales $\sim 1/100\,000$
- Effondrement de la matière ordinaire
 - ★ commence à l'égalité matière-rayonnement
 - ★ Ensuite l'expansion freine la contraction
- Pour que celà fonctionne il faut:
 - ★ Plus de matière pour expliquer tant d'effondrement
 - ★ Une matière qui ait commencé à s'effondrer avant l'égalité matière-rayonnement
 - ★ Des particules assez peu rapides (donc lourdes) pour ne pas s'échapper trop vite (et gommer les structures effondrées)



➔ Il faut de la matière noire «froide» (CDM)



Candidats Matière noire

- Objets compacts

- ★ trous noirs, étoiles ratées (naines brunes)
- ★ Exclus par les observations de microlentilles gravitationnelles

- Particules massives

- ★ Supersymétrie (cf. LHC ...)
 - Toujours pas de détection
 - directe : ex/ Edelweiss, CDMS (peut être quelque chose avec DAMA)
 - Peut être quelque chose avec CDMS le 18/12 !
 - indirecte : observation gamma. ex/ HESS
- ★ particules exotiques (Wimpzillas, ...)

- Modifications de la gravité

- ★ MOdified Newtonian Dynamics (MOND)

$$F = \begin{cases} m \frac{a^2}{a_0} & \text{si } a < a_0 \\ ma & \text{si } a > a_0 \end{cases}$$

- Nécessite «un peu» de matière noire quand même (neutrinos) ...
- En contradiction apparente avec les oscillations acoustiques de baryons



Candidats Matière noire

- Objets compacts

- ★ trous noirs, étoiles ratées (naines brunes)
- ★ Exclus par les observations de microlentilles gravitationnelles

- Particules massives

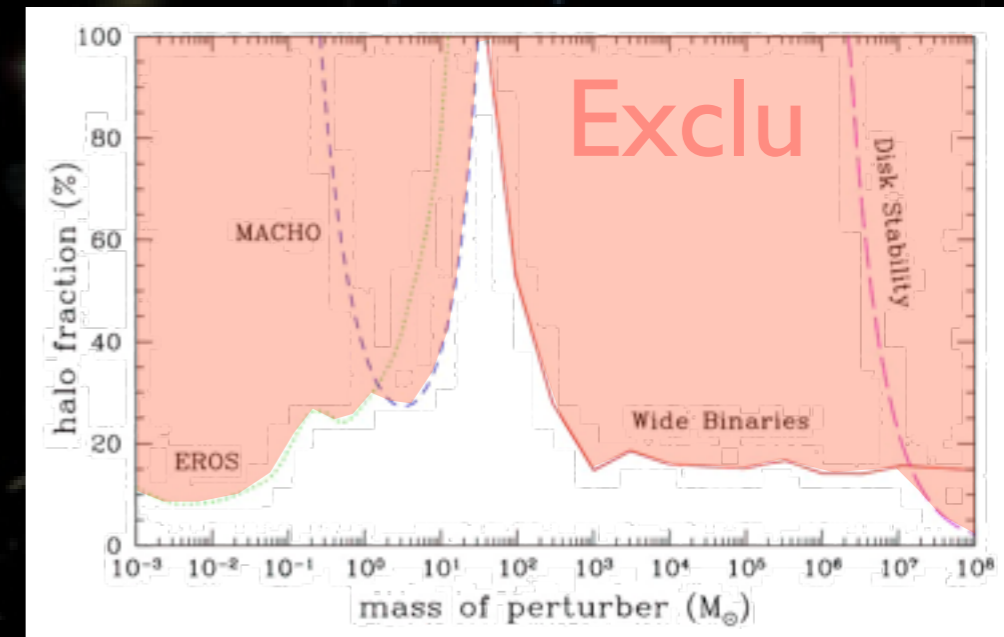
- ★ Supersymétrie (cf. LHC ...)
 - Toujours pas de détection
 - directe : ex/ Edelweiss, CDMS (peut être quelque chose avec DAMA)
 - Peut être quelque chose avec CDMS le 18/12 !
 - indirecte : observation gamma. ex/ HESS
- ★ particules exotiques (Wimpzillas, ...)

- Modifications de la gravité

- ★ MOdified Newtonian Dynamics (MOND)

$$F = \begin{cases} m \frac{a^2}{a_0} & \text{si } a < a_0 \\ ma & \text{si } a > a_0 \end{cases}$$

- Nécessite «un peu» de matière noire quand même (neutrinos) ...
- En contradiction apparente avec les oscillations acoustiques de baryons



Candidats Matière noire

- Objets compacts

- ★ trous noirs, étoiles ratées (naines brunes)
- ★ Exclus par les observations de microlentilles gravitationnelles

- Particules massives

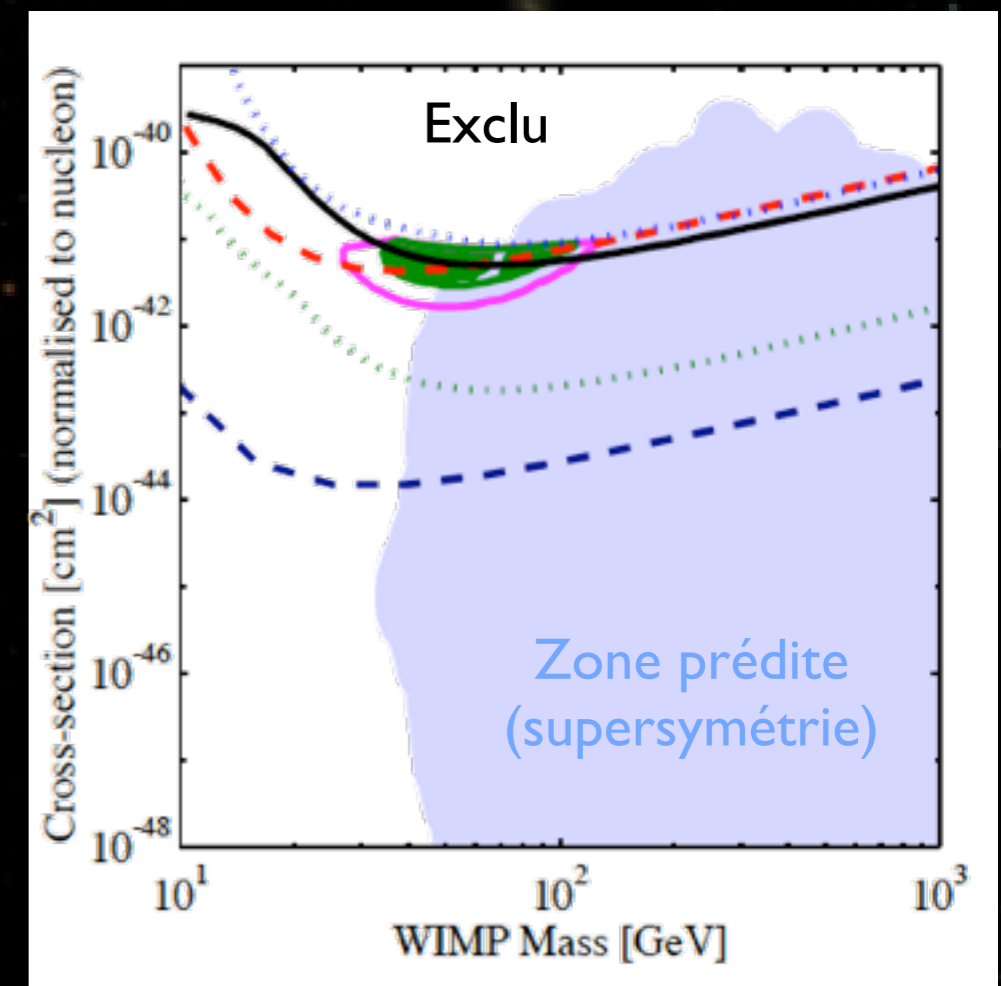
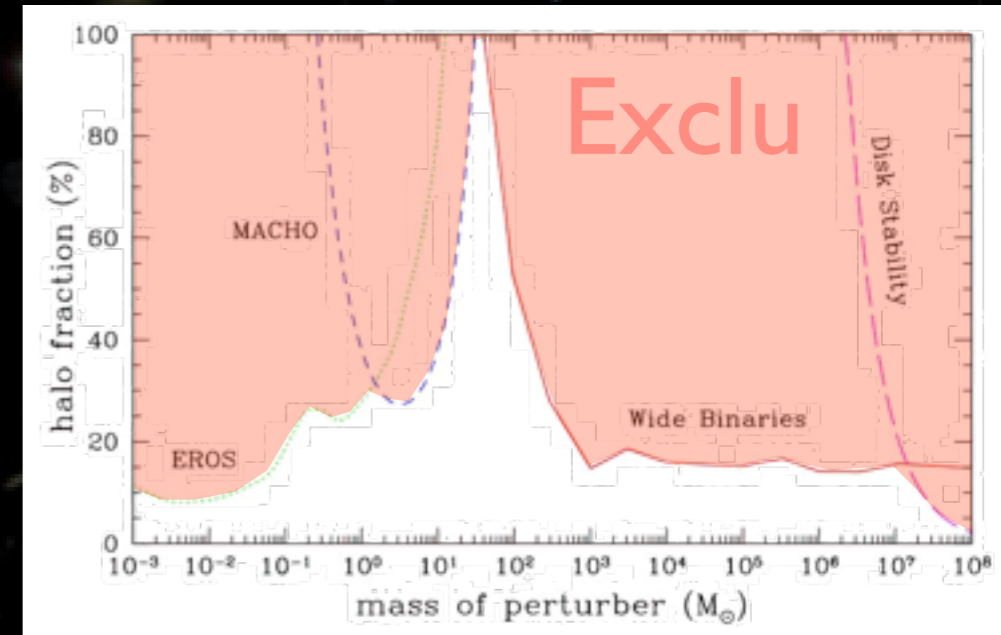
- ★ Supersymétrie (cf. LHC ...)
 - Toujours pas de détection
 - directe : ex/ Edelweiss, CDMS (peut être quelque chose avec DAMA)
 - Peut être quelque chose avec CDMS le 18/12 !
 - indirecte : observation gamma. ex/ HESS
- ★ particules exotiques (Wimpzillas, ...)

- Modifications de la gravité

- ★ MOdified Newtonian Dynamics (MOND)

$$F = \begin{cases} m \frac{a^2}{a_0} & \text{si } a < a_0 \\ ma & \text{si } a > a_0 \end{cases}$$

- Nécessite «un peu» de matière noire quand même (neutrinos) ...
- En contradiction apparente avec les oscillations acoustiques de baryons



Candidats Matière noire

- Objets compacts

- ★ trous noirs, étoiles ratées (naines brunes)
- ★ Exclus par les observations de microlentilles gravitationnelles

- Particules massives

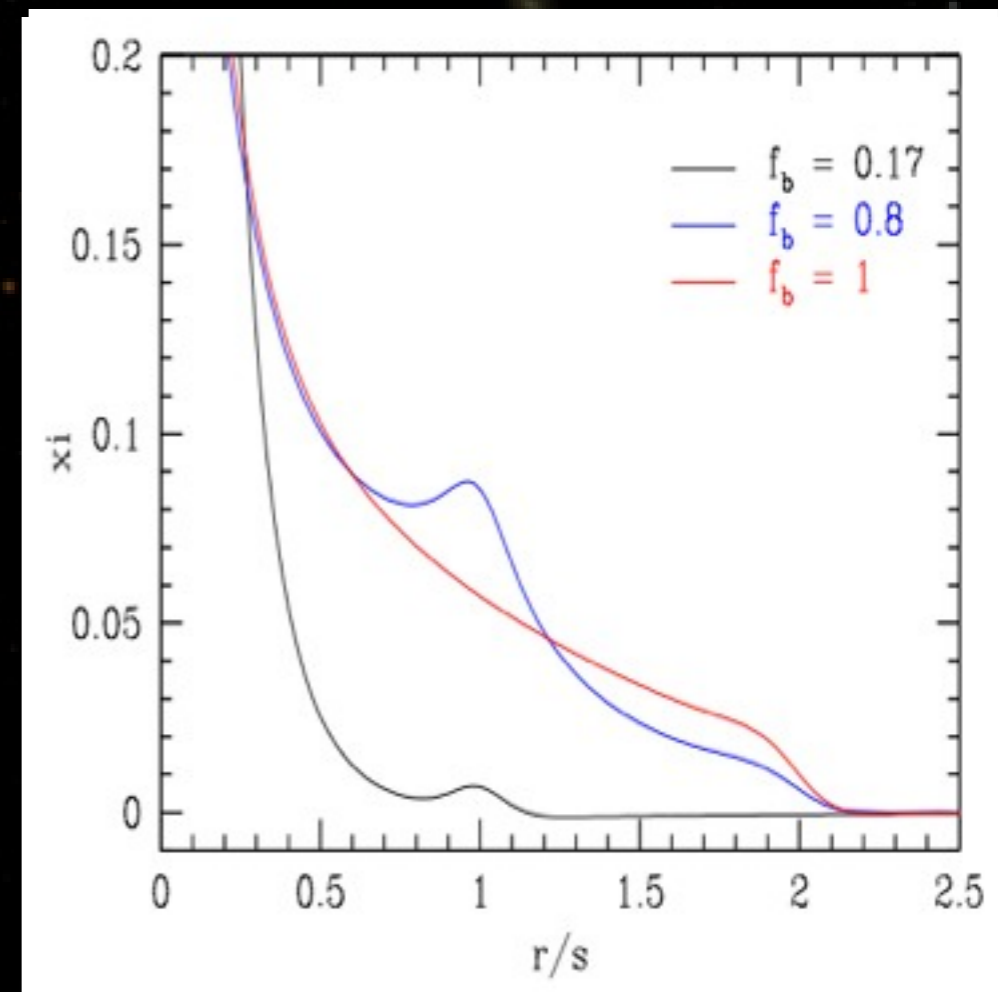
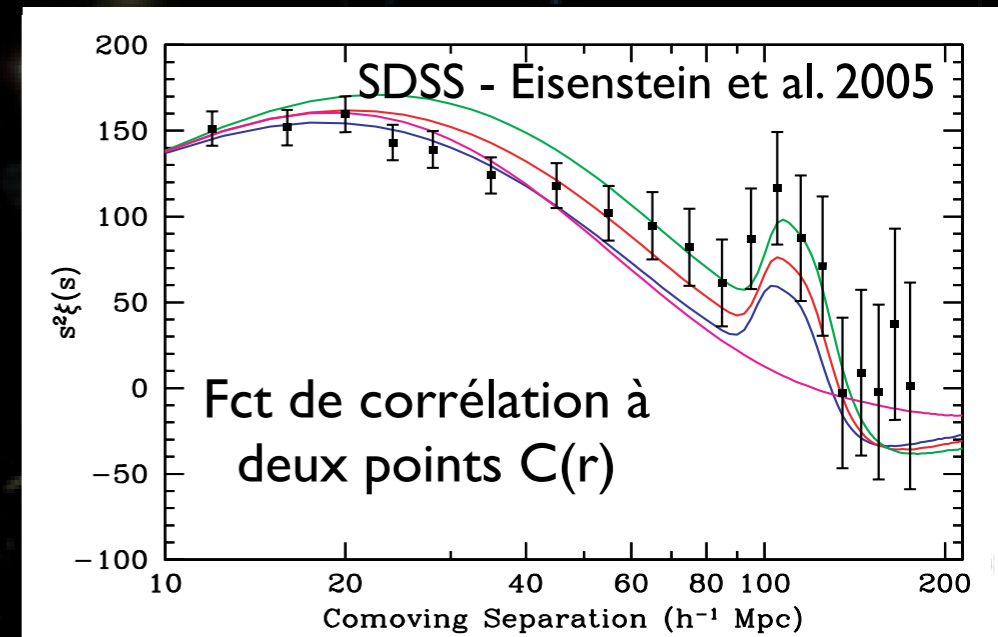
- ★ Supersymétrie (cf. LHC ...)
 - Toujours pas de détection
 - directe : ex/ Edelweiss, CDMS (peut être quelque chose avec DAMA)
 - Peut être quelque chose avec CDMS le 18/12 !
 - indirecte : observation gamma. ex/ HESS
- ★ particules exotiques (Wimpzillas, ...)

- Modifications de la gravité

- ★ MOdified Newtonian Dynamics (MOND)

$$F = \begin{cases} m \frac{a^2}{a_0} & \text{si } a < a_0 \\ ma & \text{si } a > a_0 \end{cases}$$

- Nécessite «un peu» de matière noire quand même (neutrinos) ...
- En contradiction apparente avec les oscillations acoustiques de baryons



Candidats Matière noire

- ~~Objets compacts~~

- ★ trous noirs, étoiles ratées (naines brunes)
- ★ Exclus par les observations de microlentilles gravitationnelles

- Particules massives

- ★ Supersymétrie (cf. LHC ...)
 - Toujours pas de détection
 - directe : ex/ Edelweiss, CDMS (peut être quelque chose avec DAMA)
 - Peut être quelque chose avec CDMS le 18/12 !
 - indirecte : observation gamma. ex/ HESS
- ★ particules exotiques (Wimpzillas, ...)

- ~~Modifications de la gravité~~

- ★ MOdified Newtonian Dynamics (MOND)

$$F = \begin{cases} m \frac{a^2}{a_0} & \text{si } a < a_0 \\ ma & \text{si } a > a_0 \end{cases}$$

- Nécessite «un peu» de matière noire quand même (neutrinos) ...
- En contradiction apparente avec les oscillations acoustiques de baryons

