

Les fondements de la cosmologie actuelle



J.-Ch. Hamilton, APC

hamilton@apc.univ-paris7.fr

<http://www.apc.univ-paris7.fr/~hamilton/>

Introduction

- **Cosmologie :**
 - ★ Étude de la dynamique du contenu et de l'histoire de l'Univers
 - ★ L'Univers : c'est tout ...
 - ★ Objectif ambitieux ...
 - incite à la prudence quant à l'interprétation...

- **Une science ?**
 - ★ basée sur un modèle précis (le Big-Bang)
 - ★ lui même basé sur deux théories fermement établies
 - Relativité Générale
 - Théorie Quantique des Champs
 - ★ Modèle confirmé par de nombreuses (récentes) observations
 - ★ Nombreuses prédictions, toujours été confirmées
 - ★ Caractère scientifique reconnu par la communauté:
 - 3 prix Nobel dont 2 les 5 dernières années (CMB & Supernovae de type Ia)

Introduction (suite)

- Un (léger) problème conceptuel toutefois

- ★ On observe l'Univers de l'intérieur, toujours du même endroit

- Pas d'expériences possibles, juste des observations
- Peu de contrôle sur les conditions initiales

- ★ Mais heureusement

- l'Univers est vaste (peut être même infini ... Cf. Multivers plus tard dans le cours)
- La gravitation est une force extrêmement faible

Intéraction forte	Intéraction électromagnétique	Intéraction faible	Gravitation
10^{38}	10^{36}	10^{25}	1

➔ On peut observer de nombreux systèmes isolés les uns des autres

➔ L'objection est essentiellement levée ... ouf !

Introduction (suite)

- **Simplifier le problème:**
 - ★ S'abstraire de l'anecdotique
 - ★ lisser l'image sans en perdre l'essentiel
 - ★ finalement essayer de résumer l'Univers en une quinzaine de chiffres
- **Démarche classique en Physique**
 - ★ Mais il faut reconnaître qu'ici on la pousse à l'extrême
- **En gros:**
 - ★ un milieu en expansion (donc plus petit par le passé)
 - ★ de très faible densité aujourd'hui $\sim 10^{-26} \text{ kg.m}^{-3}$
 - ★ un composition étrange:
 - en nombre : beaucoup de photons et neutrinos, mais faible fraction de l'énergie
 - 4% de l'énergie sous forme de matière «ordinaire»
 - 20% sous forme de matière «noire» (inconnue, sans doute des particules)
 - 76% sous forme d'«énergie sombre» (inconnue, sans doute pas des particules)
 - ★ Certaines espèces étaient en équilibre thermiques, pas d'autres...
 - ★ Seule la gravité semble vraiment compter aujourd'hui

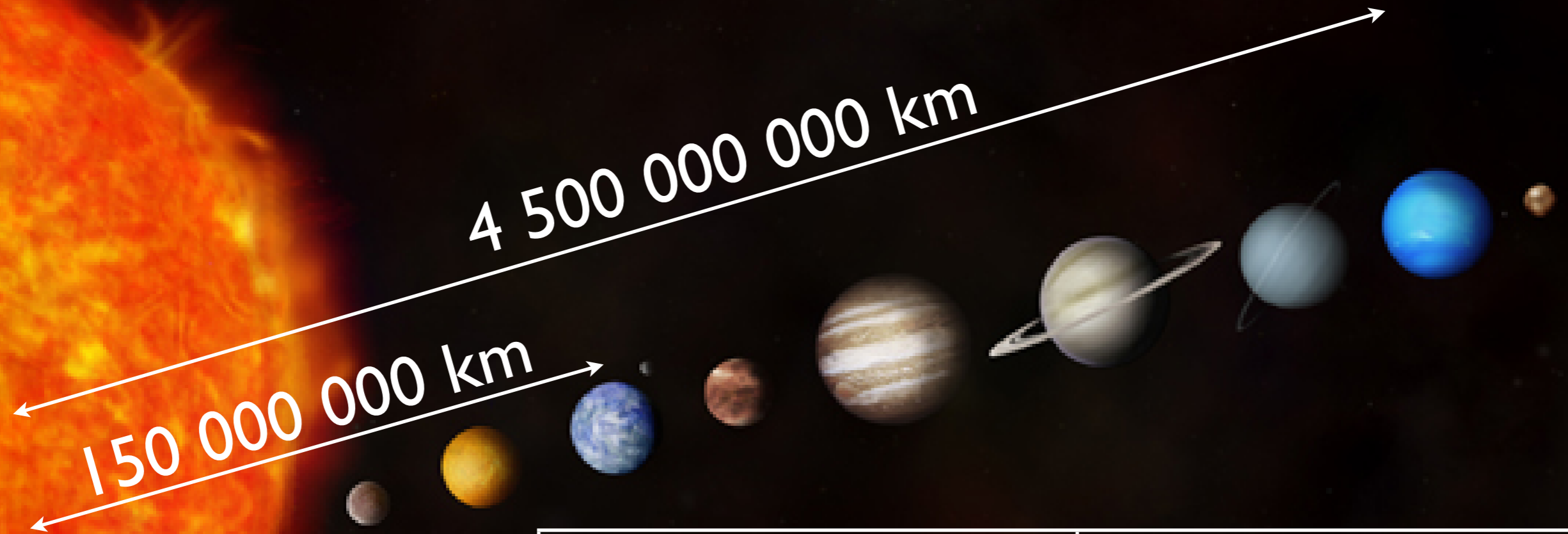
Introduction (suite et fin)

- **Modèle de la cosmologie «classique»: Big-Bang**
 - ★ beau succès
 - ★ mais trop simple car trop «lisse»
- **Cosmologie moderne:**
 - ★ Comprendre les structures observées (inflation ?)
 - ★ Comprendre les espèces mystérieuses (matière et énergie noires)
 - ★ Comprendre l'Univers primordial
- **Cette conférence tentera d'aborder tous ces points**

N'attendez pas des miracles!



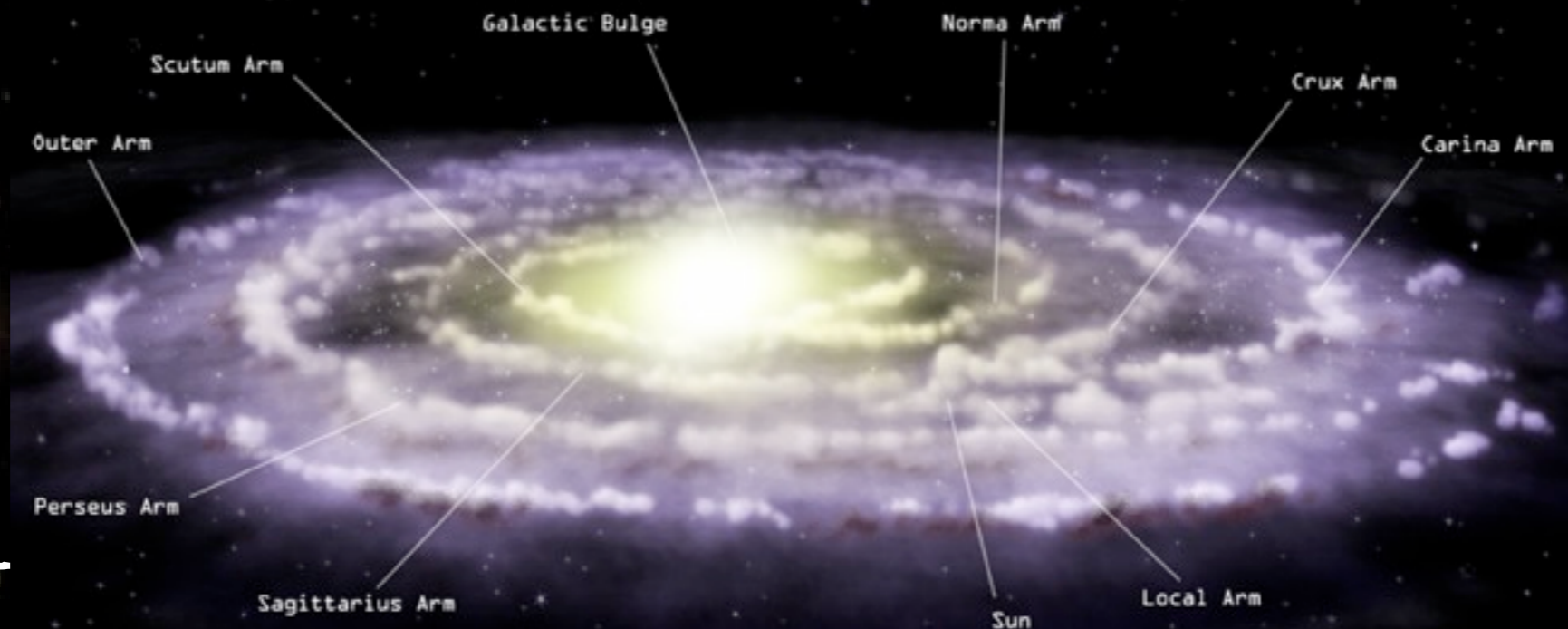
Le système solaire



Objet et Taille réelle	Ramenée à la Géode (la Villette)
Soleil: 1.4×10^6 km	18 m : La Géode
Distance Terre-Soleil: 150×10^6 km	1.9 km : Place de la république
Rayon de la Terre: 6400 km	8.2 cm : Melon
Distance Terre-Lune: 380000 km	4.9 m : Place de la république
Rayon de la Lune : 1700 km	2.2 cm : Abricot
Distance Neptune-Soleil : 4.5×10^9 km	57.8 km : Fontainebleau
Rayon de Neptune : 24000 km	30 cm : Ballon Sauteur
distance de Proxima Centauri : 4×10^{13} km	51400 km : 1.5 fois plus loin que la Lune

Échelles galactiques

Objet et Taille réelle	Ramenée à une noix à UP7
Distance Neptune-Soleil : 4.5×10^9 km	1 cm : une noix
distance de Proxima Centauri : 4×10^{13} km	88 m : ~30 étages
Épaisseur du bras spiral d'Orion: 1000 a.l.	21 km : Versailles
Rayon du disque Galactique: 80000 a.l.	1681 km : Stockholm
Épaisseur du disque Galactique : 3000 a.l.	63 km : Fontainebleau
Galaxie d'Andromède : 2.4 M a.l.	50000 km : 1/7 de la distance Terre-Lune

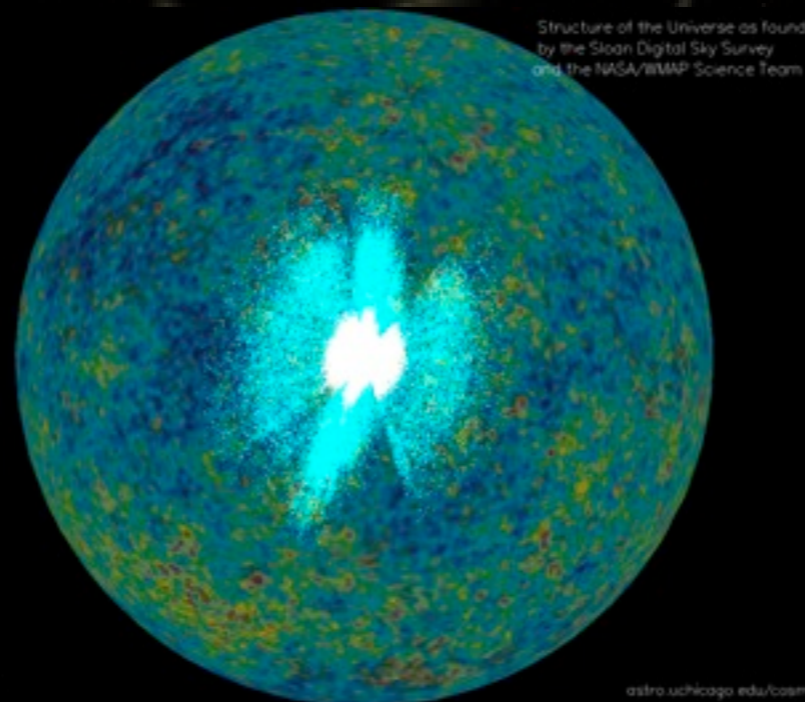


Échelles cosmologiques

<u>Objet et Taille réelle</u>	<u>Ramenée à un humain à UP7</u>
Rayon du disque Galactique: 80000 a.l.	1.8 m : un humain
Galaxie d'Andromède : 2.4 M a.l.	54 m : ~20 étages
Groupe local : 10 M a.l.	225 m : Tour Montparnasse
Amas de la Vierge : 54 M a.l.	1.2 km : de UP7 à la Gare de Lyon
Galaxies à $z=0.5$: 6.2 G a.l.	140 km : Reims
Quasars distants ($z=5$) : 25 G a.l.	562 km : Avignon
Univers observable (CMB) : 44 G a.l.	990 km : Madrid

Attention:

distances «propres» - dans un Univers en expansion, la définition de distance n'est pas triviale (Cf. plus loin...)



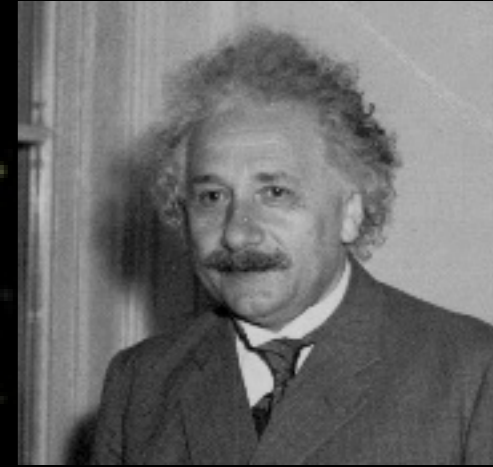
Les piliers de la cosmologie

- La relativité Générale (théorie)
- L'expansion de l'Univers (observation)
- Le principe cosmologique (hypothèse puis observation)



un Univers courbe !

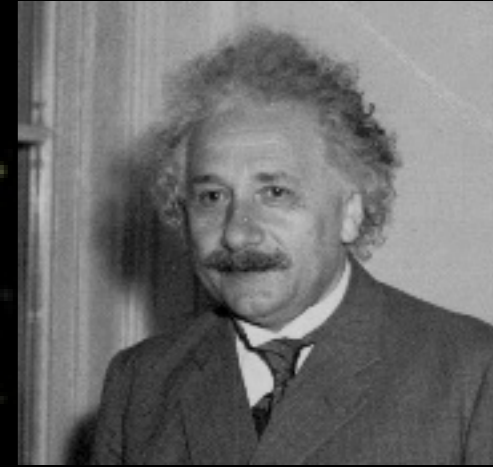
- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger



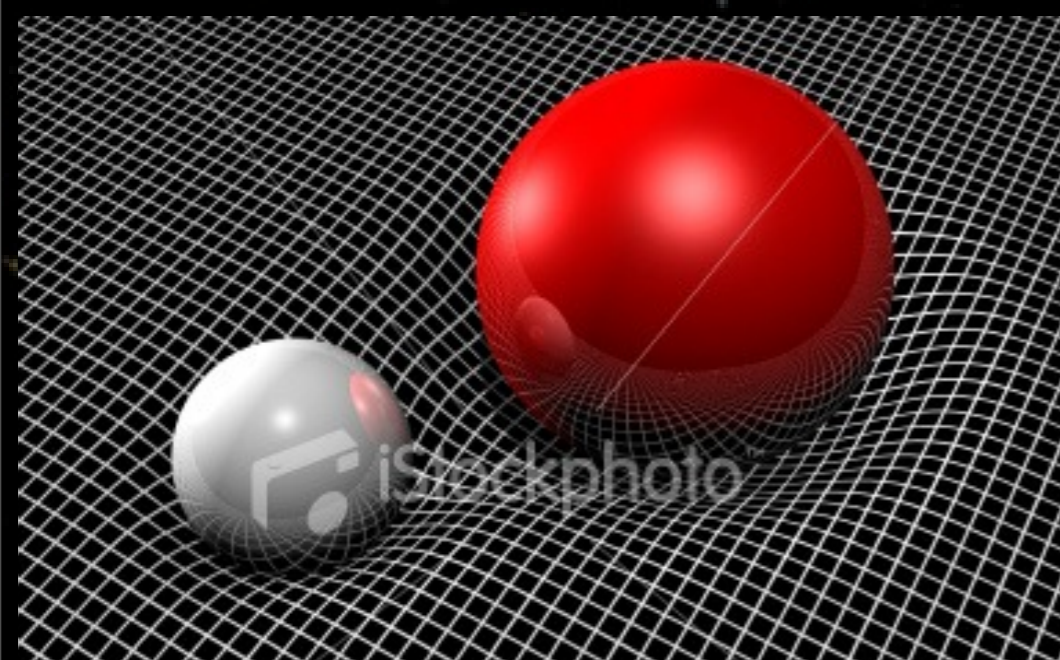
A. Einstein

un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

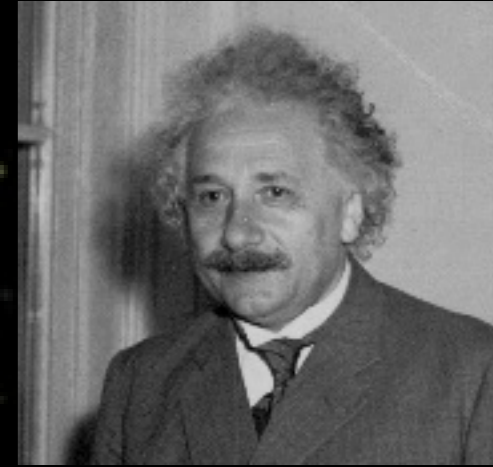


A. Einstein

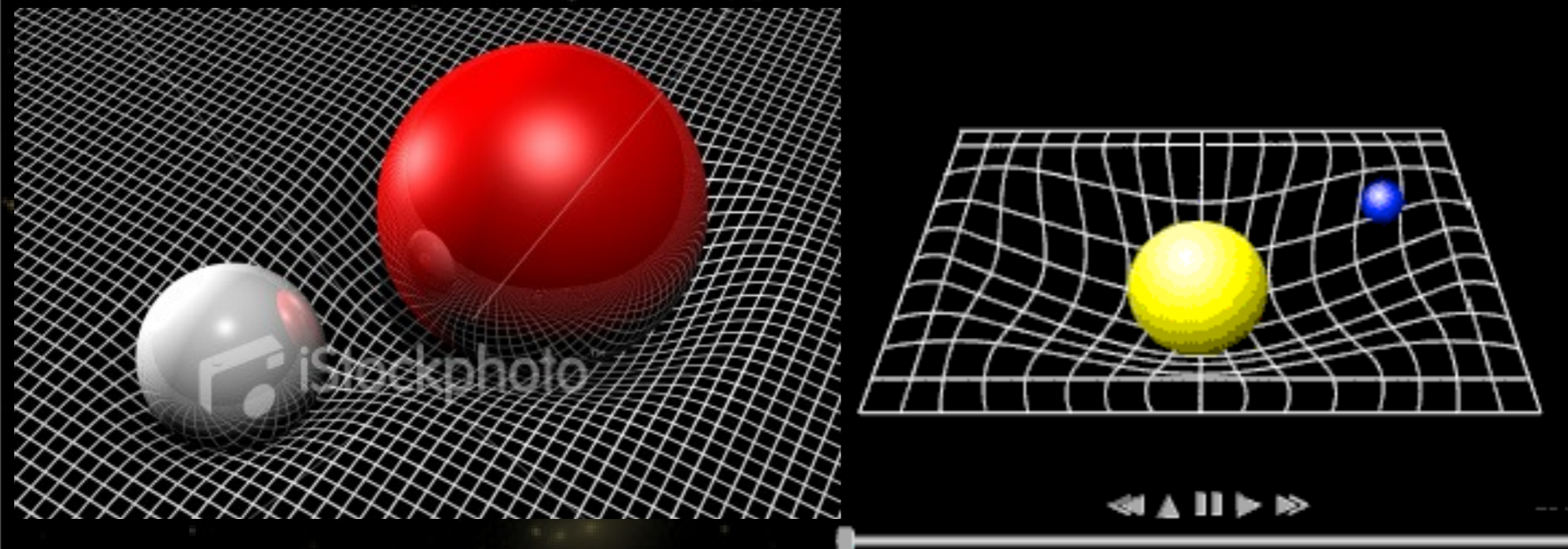


un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

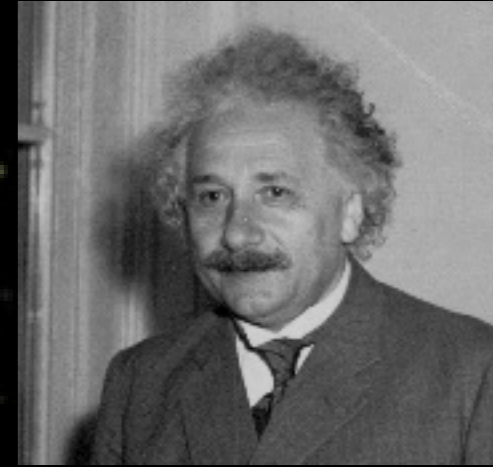


A. Einstein

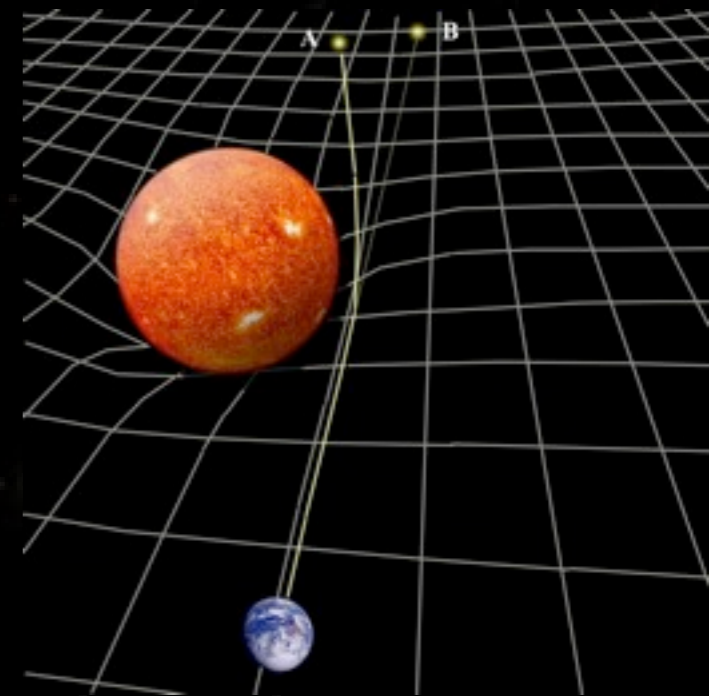
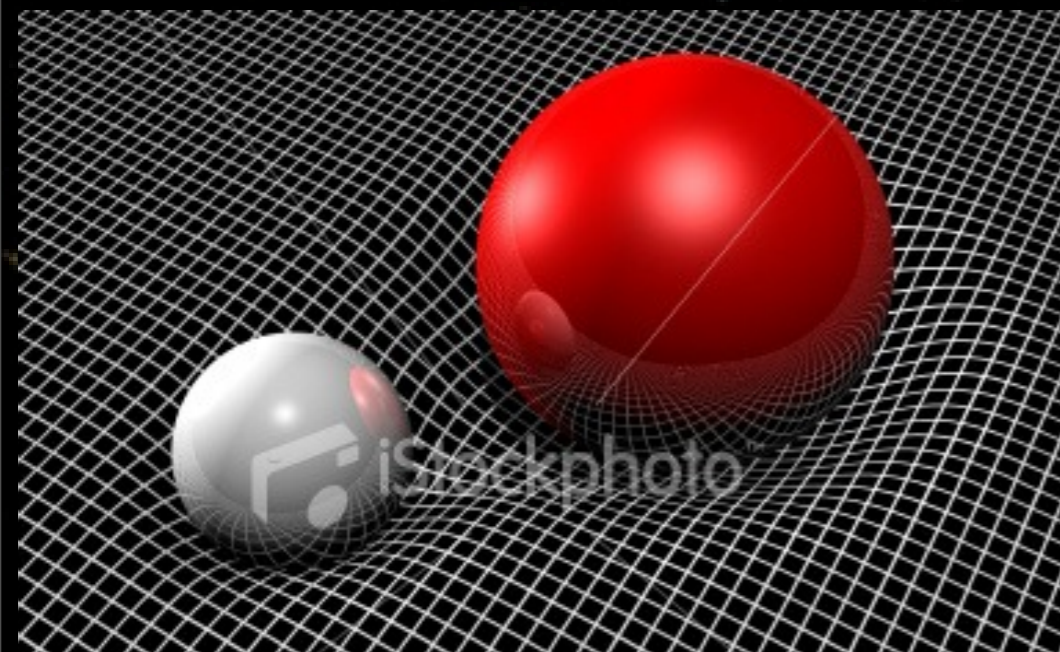


un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)
 - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
 - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
 - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

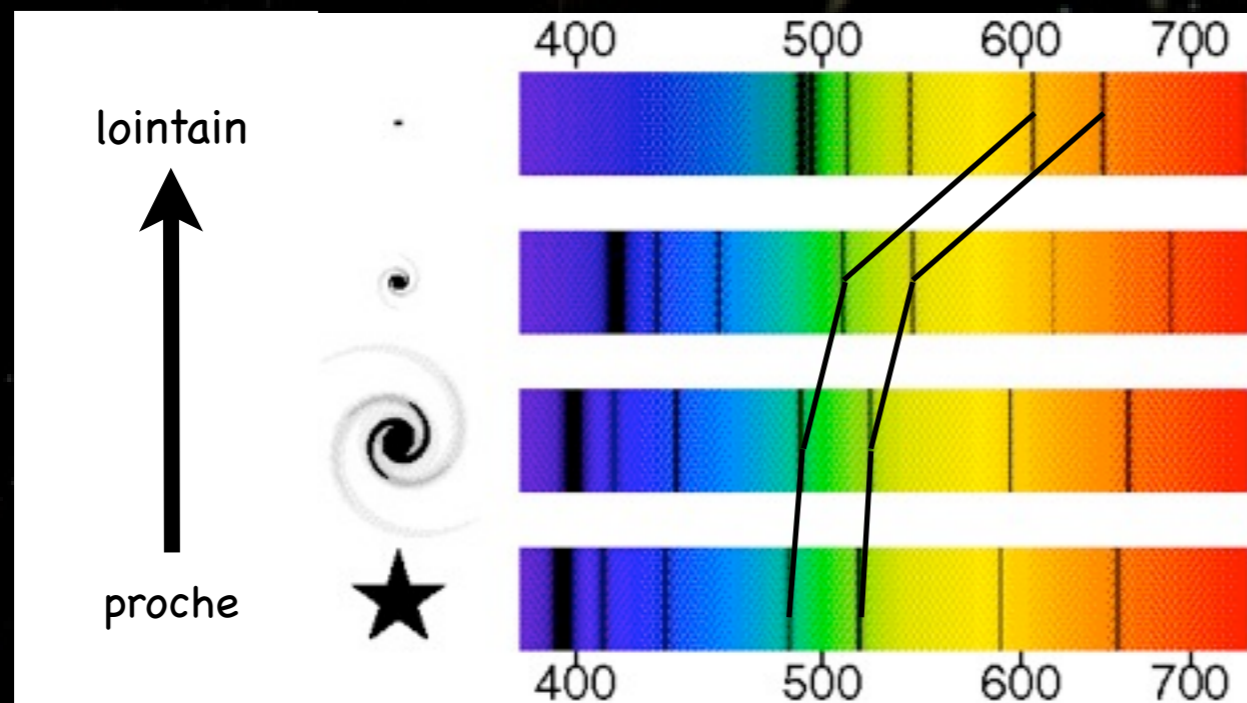


A. Einstein



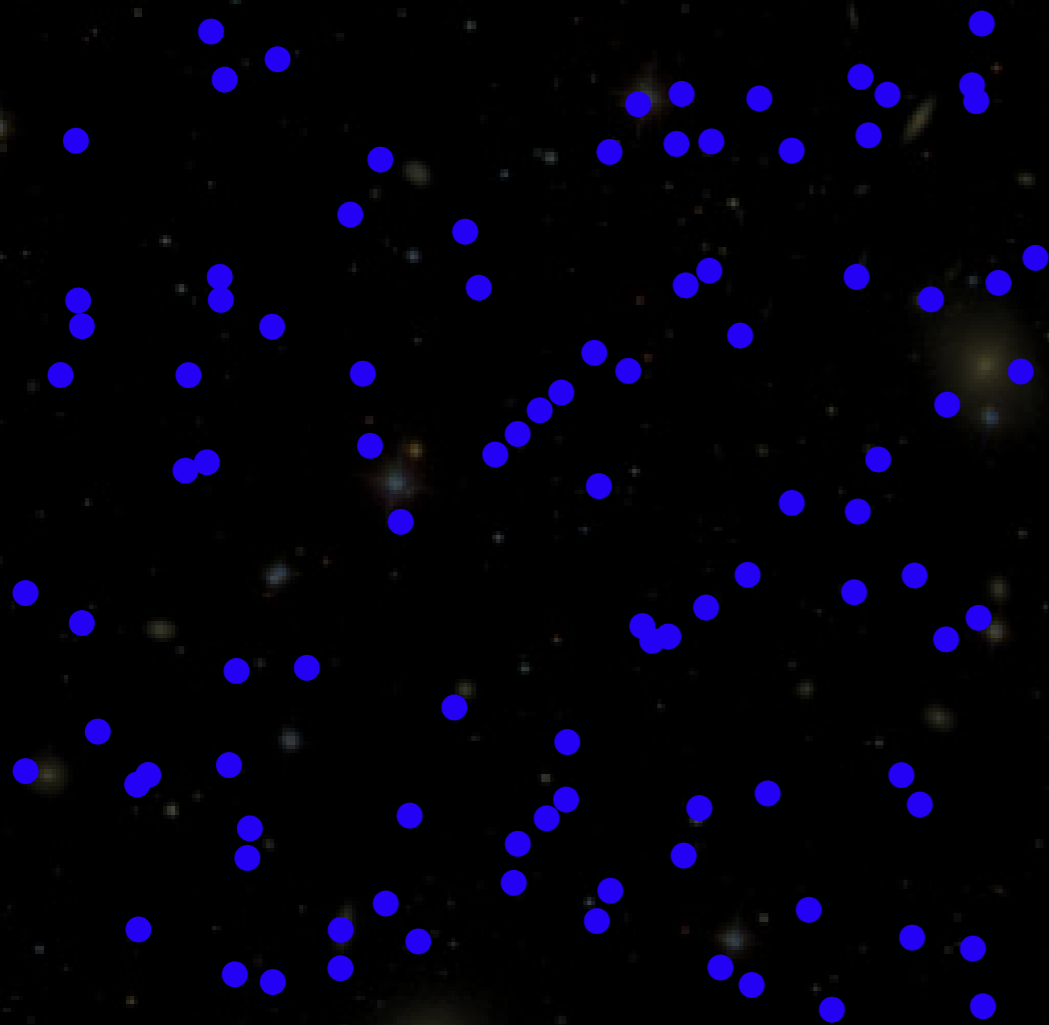
L'Univers en expansion

- E. Hubble (1929) :
 - Le décalage vers le rouge des galaxies est proportionnel à leur distance

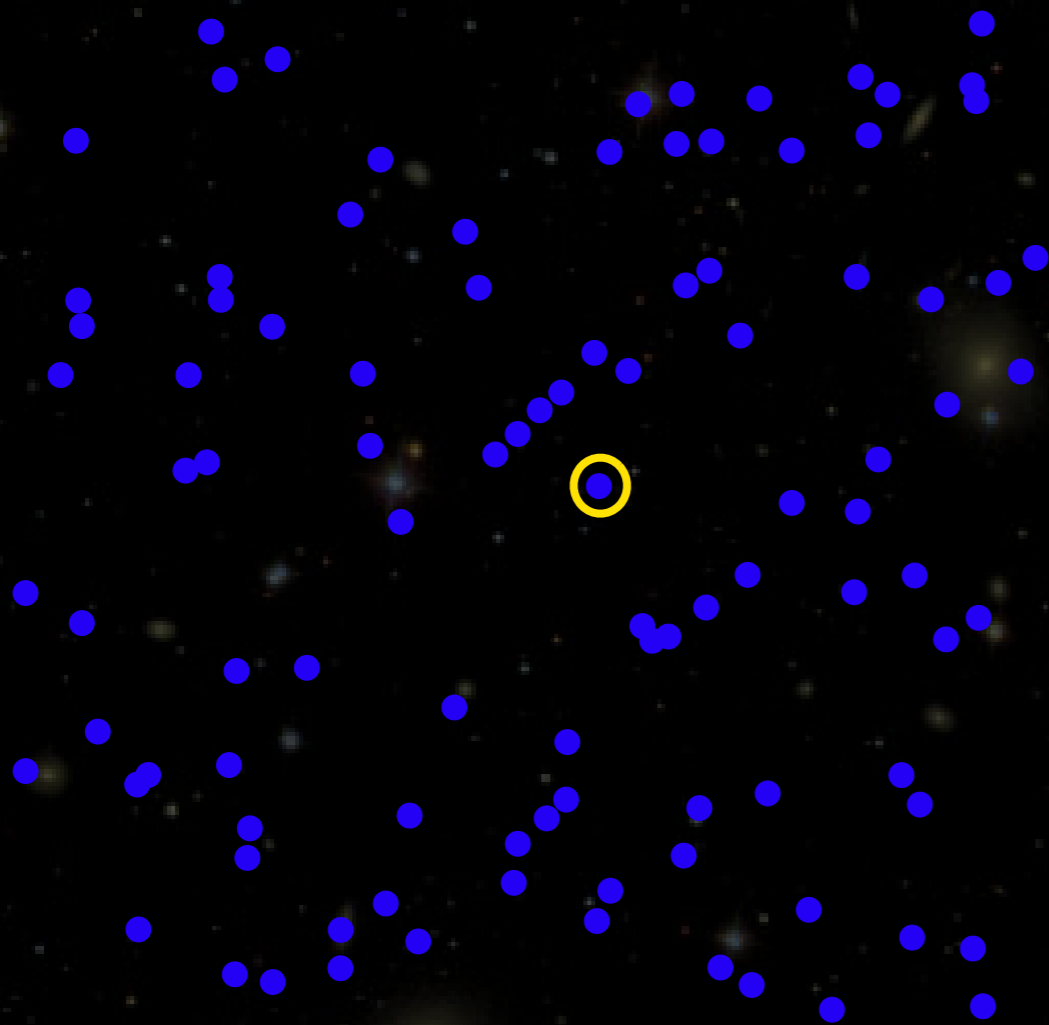


- Si ce décalage vers le rouge est interprété comme un effet Doppler :
 - La vitesse radiale des galaxies est proportionnelle à leur distance : loi de Hubble $v = H_0 \times d$

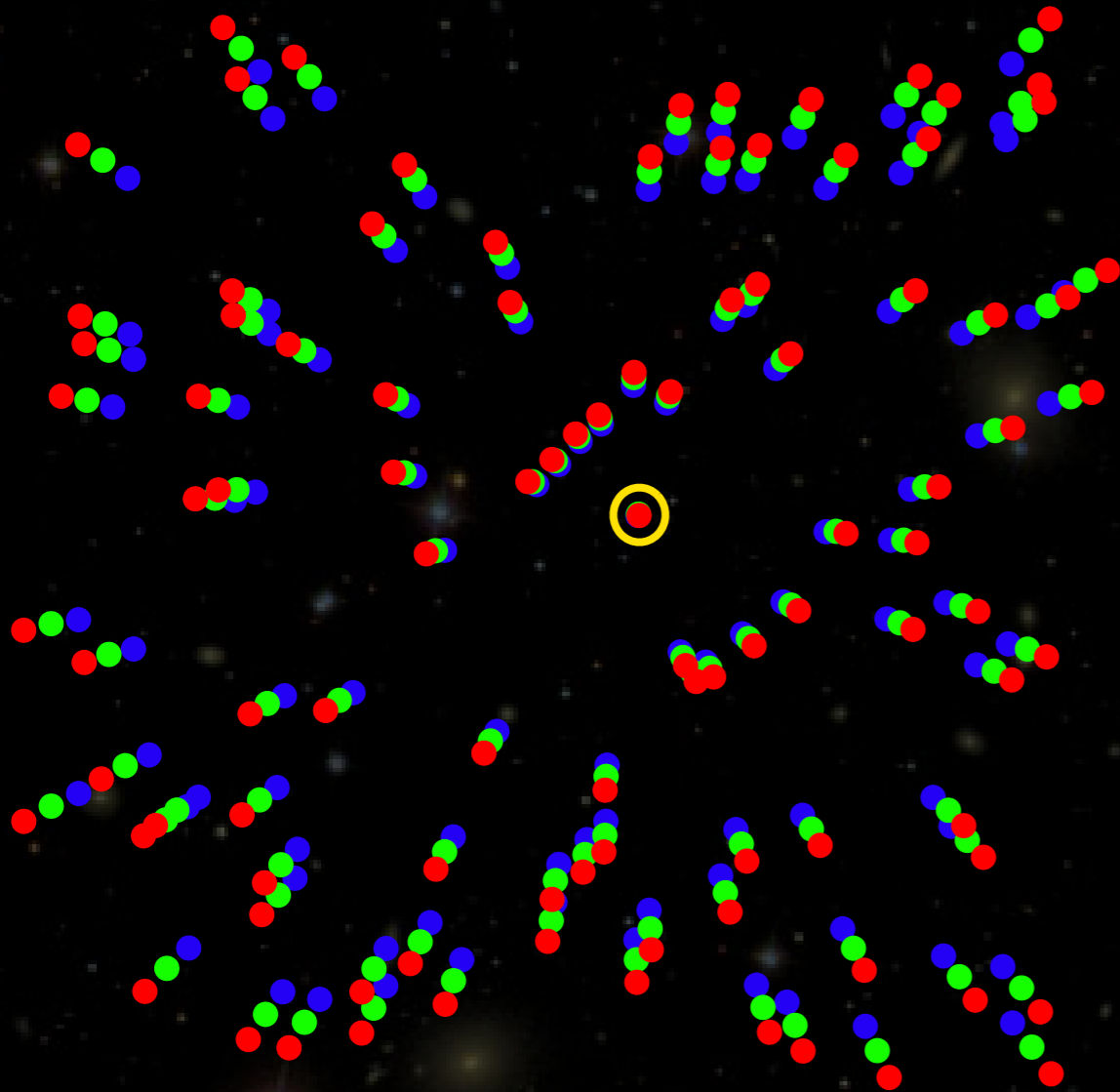
L'expansion est globale



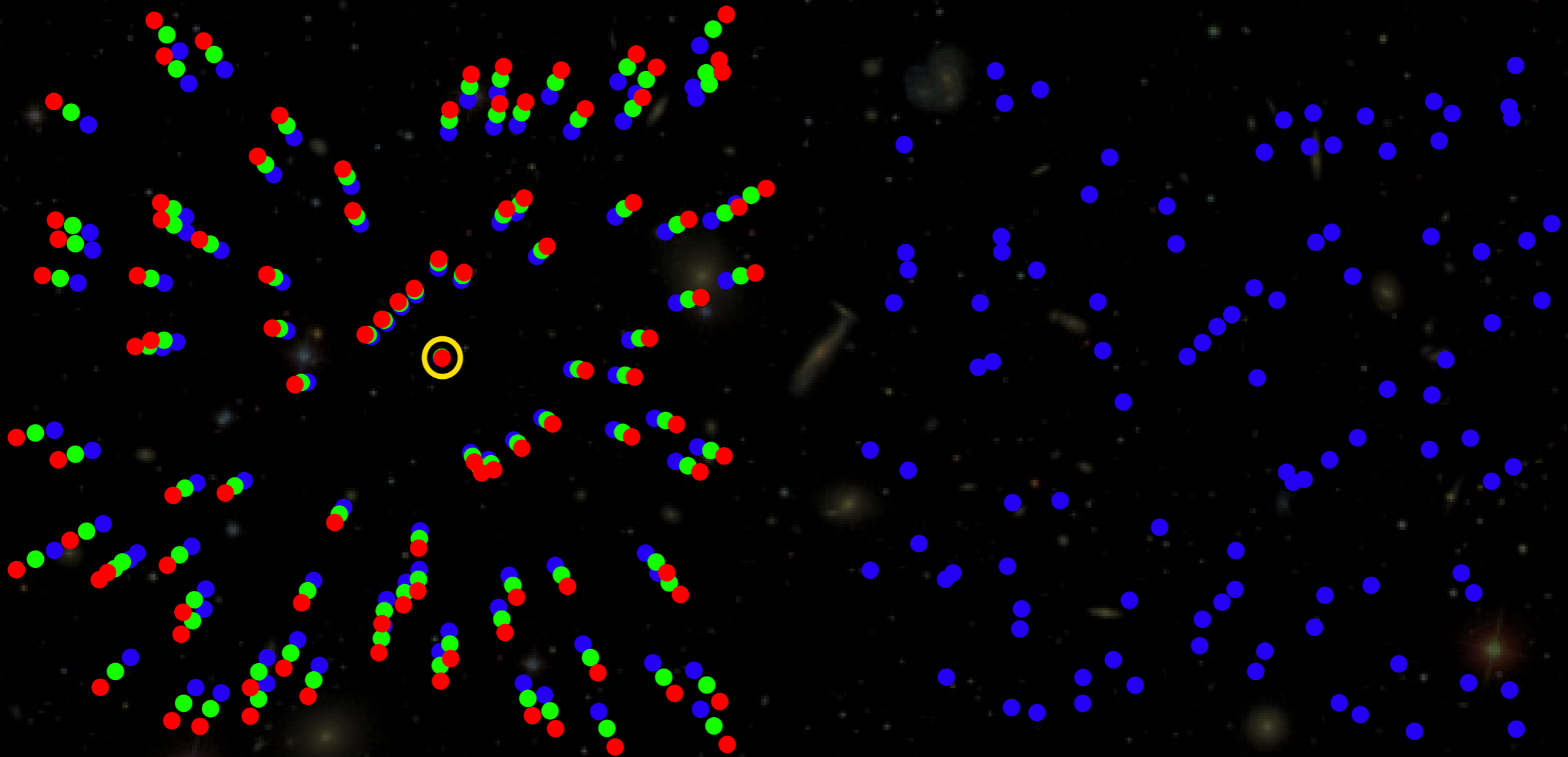
L'expansion est globale



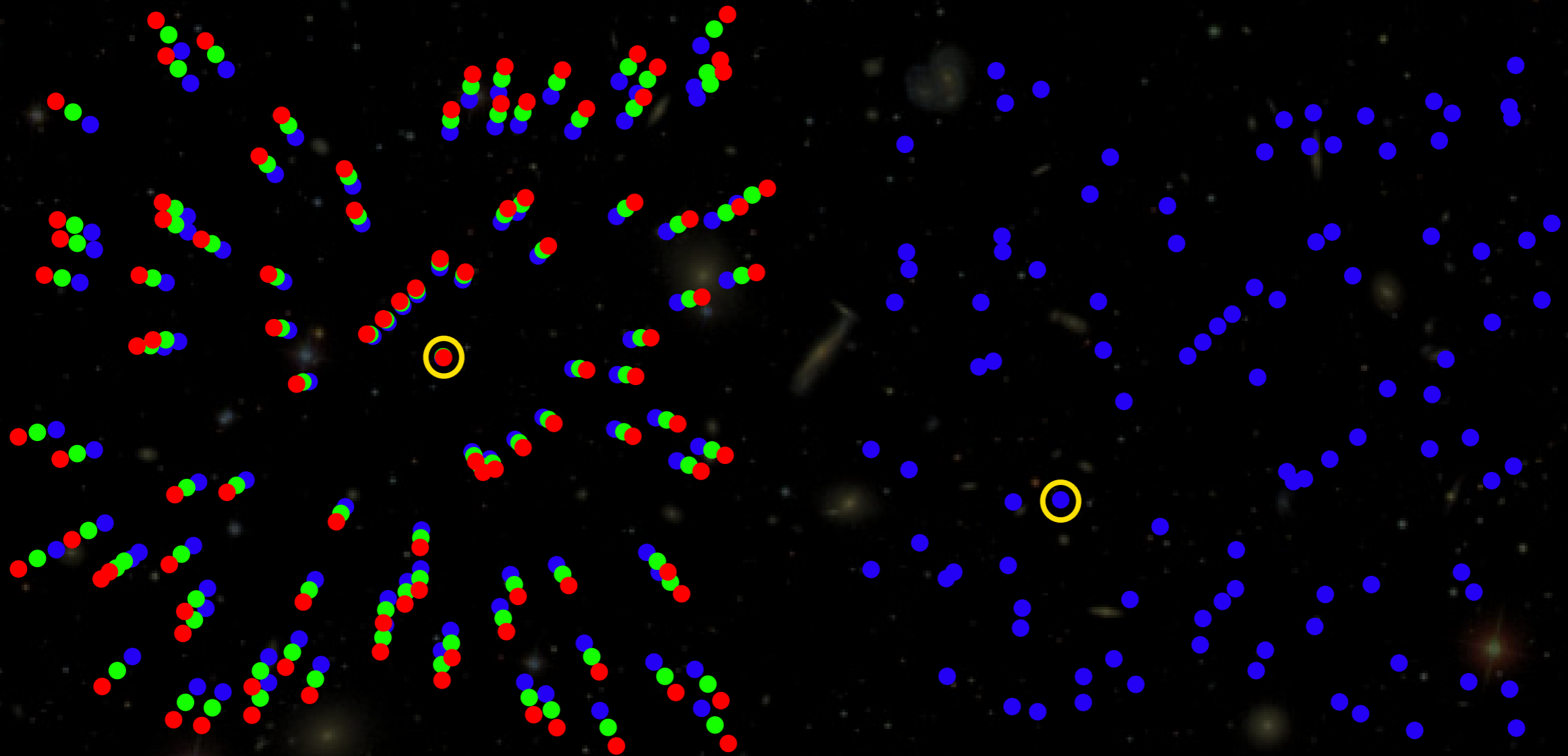
L'expansion est globale



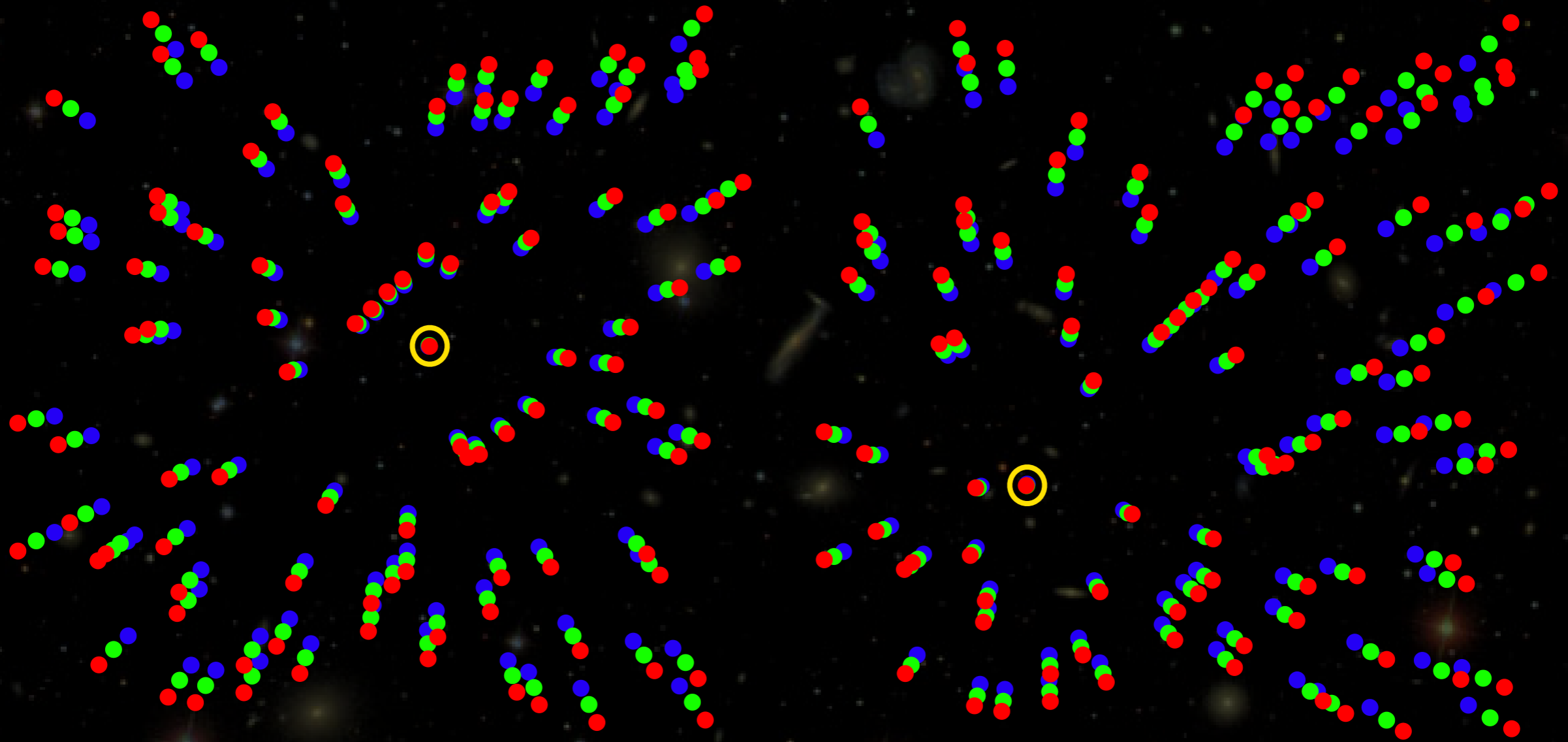
L'expansion est globale



L'expansion est globale



L'expansion est globale



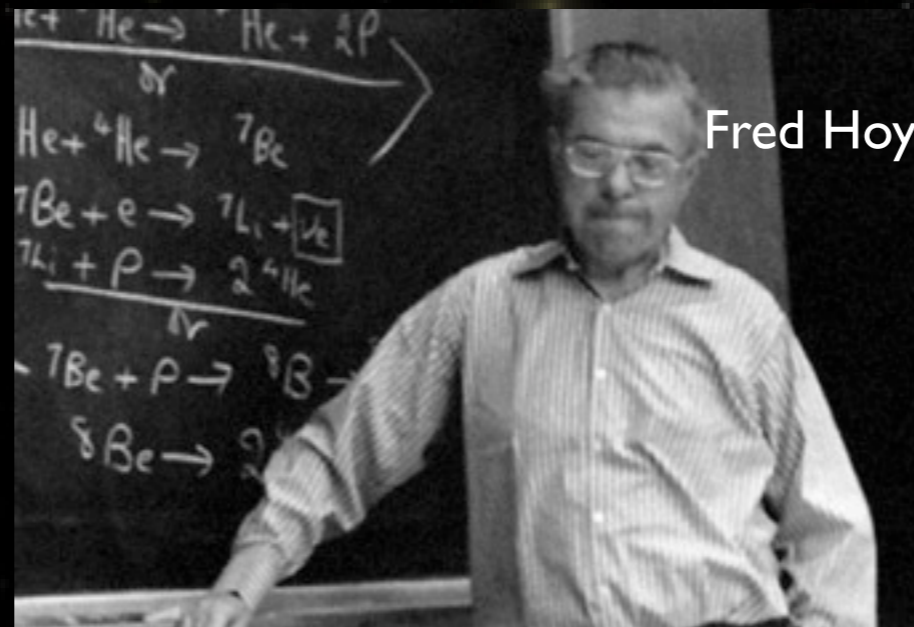
De partout en même temps ...

Big Bang ?

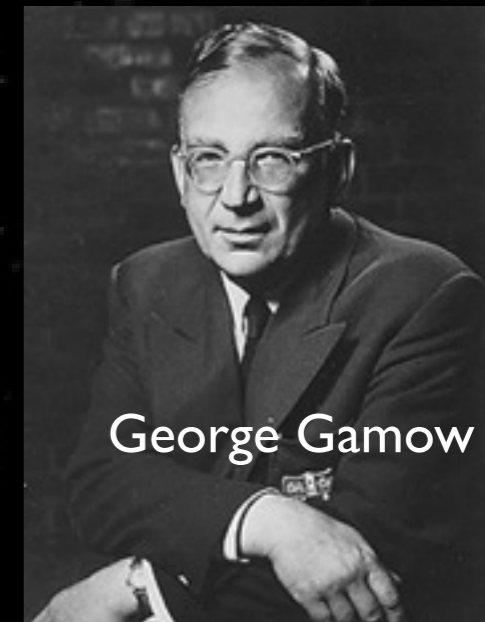
- **Georges Lemaître (1927)**
 - ★ Relativité Générale \Rightarrow Univers dynamique : expansion ou contraction
 - ★ À partir d'observations, il opte pour l'expansion
 - ★ Modèle de «l'atome primitif» :
 - Plus on remonte par le passé tout était plus dense (et donc plus chaud). L'univers est alors né d'un atome primitif qui s'est «désintégré» au cours de l'expansion
 - ★ Cette idée choque nombre de physiciens dont Fred Hoyle qui la qualifie de «Big Bang» de manière moqueuse.
 - ★ Elle ne séduit pas Einstein qui préfère un Univers statique
 - ★ Hubble règle la question en 1929, Gamow l'étudie en détails en 1940



Georges Lemaître



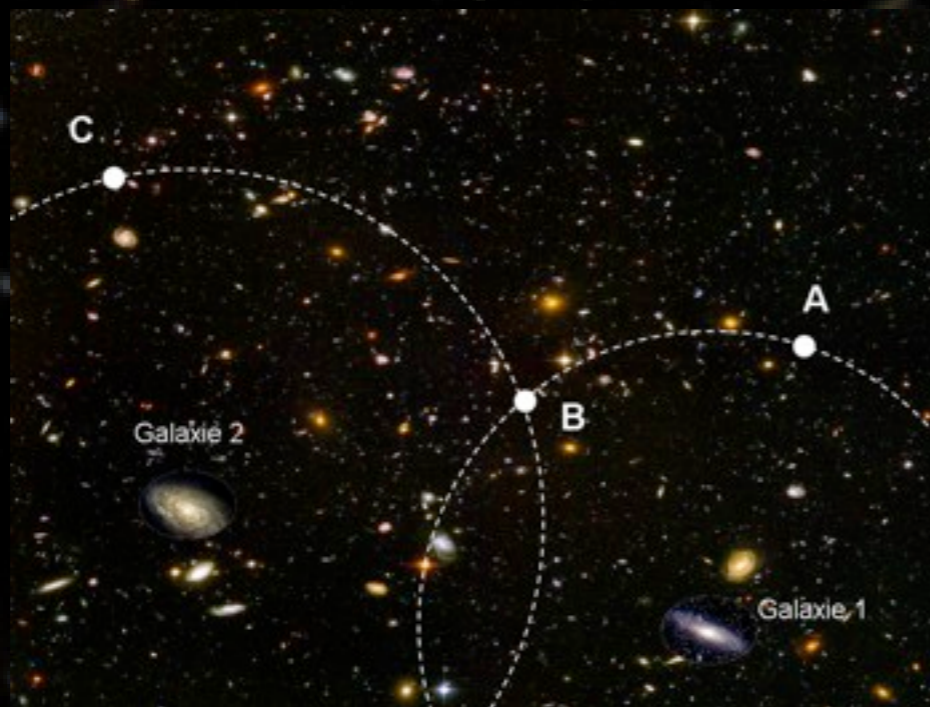
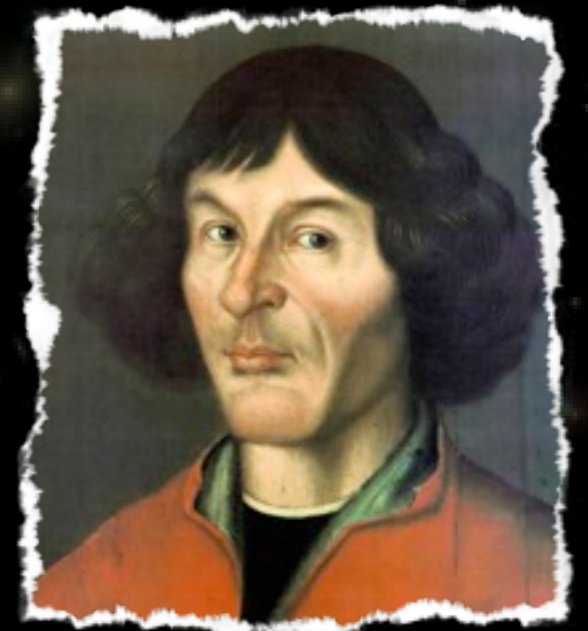
Fred Hoyle



George Gamow

Le principe cosmologique

- Idée tirée du principe Copernicien
 - ★ La Terre n'est pas au centre du système solaire
- Extension à la cosmologie
 - ★ L'univers n'a pas de point de vue privilégié
 - ➔ il est isotrope



isotropie pour la galaxie 1 :
propriétés de A et B identiques

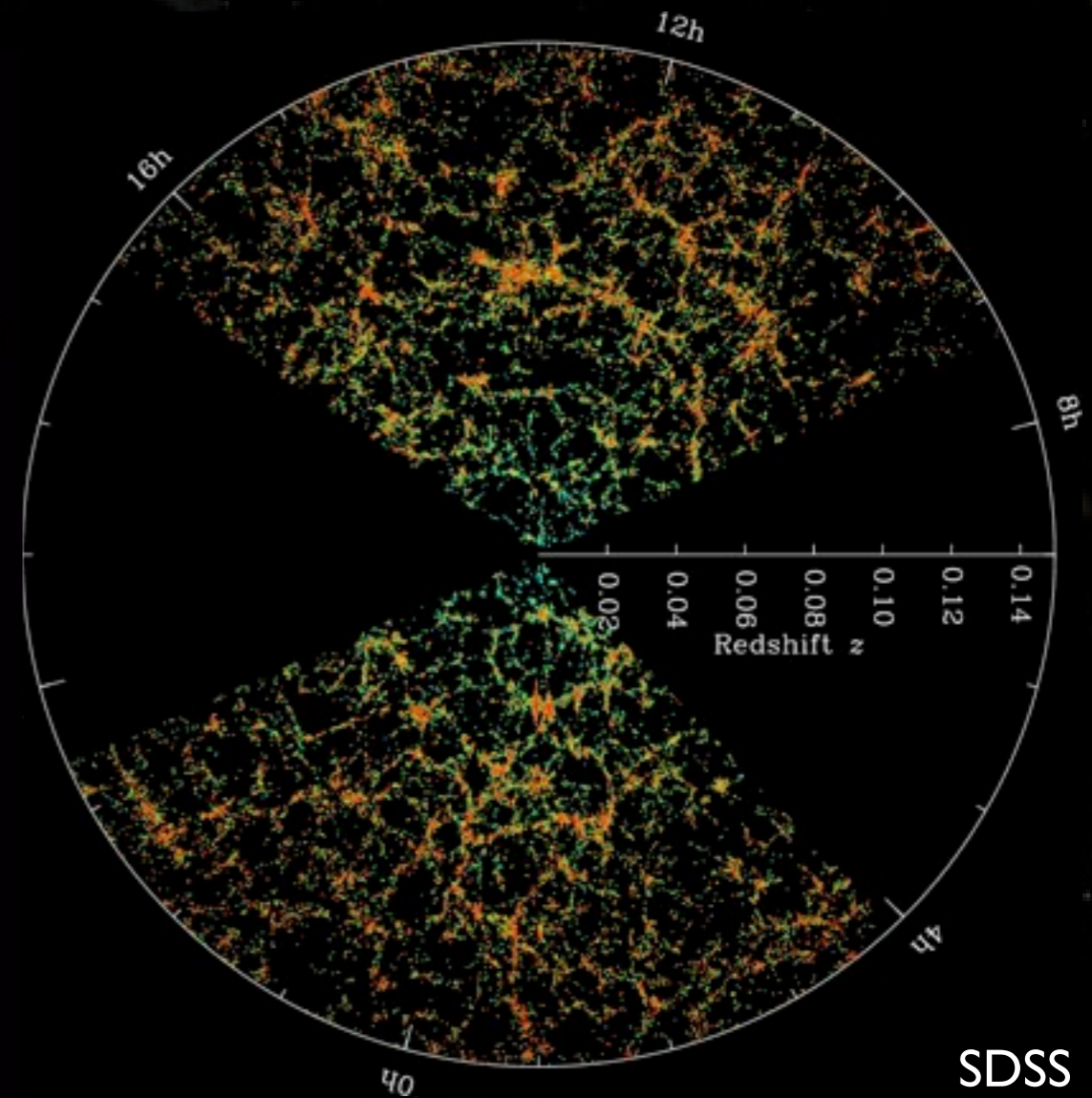
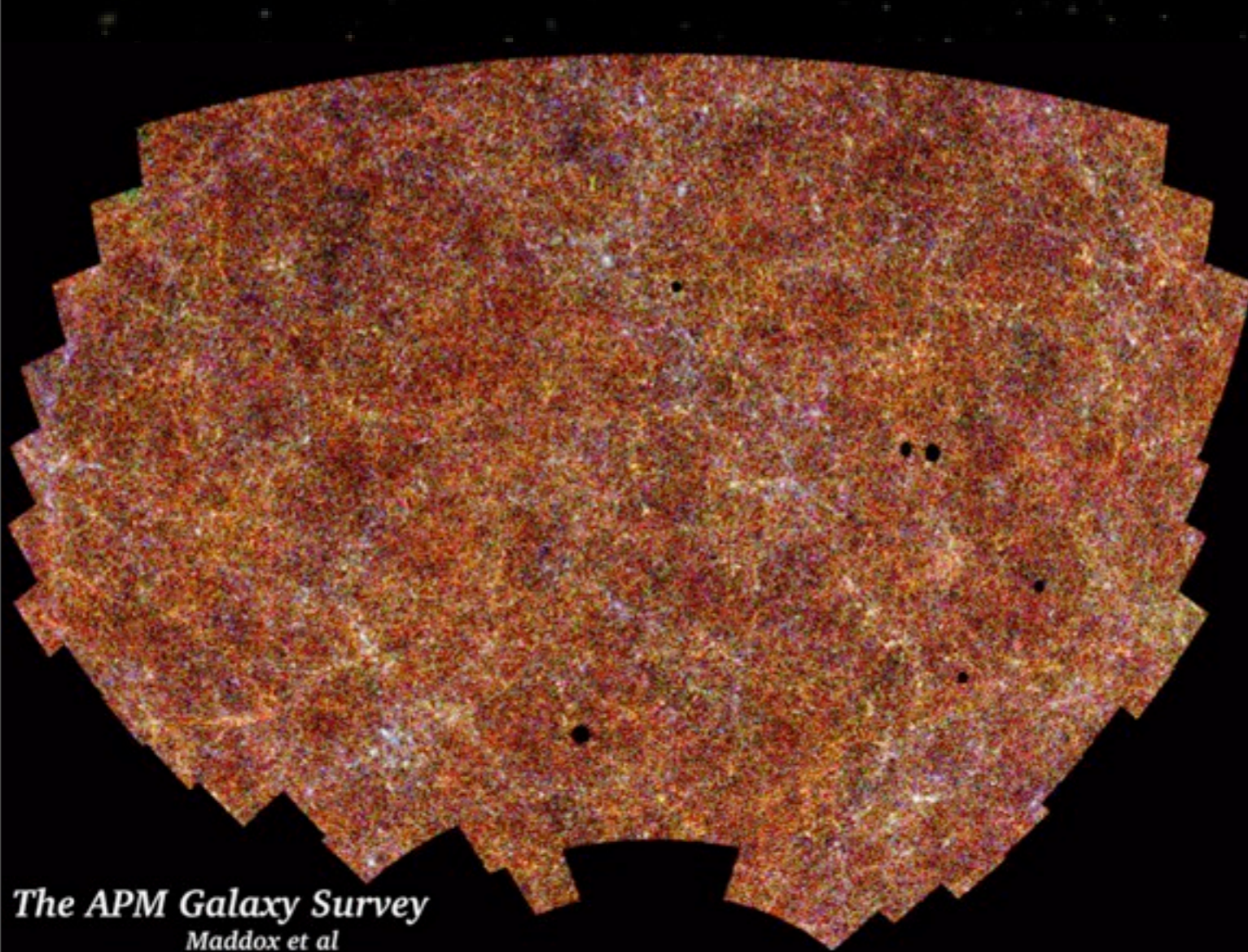
isotropie pour la galaxie 2 :
propriétés de B et C identiques

donc les propriétés
cosmologiques en A et en C sont
identiques = homogénéité

- «L'Univers est homogène et isotrope» (aux grandes échelles)

Le principe cosmologique :

«Aux grandes échelles l'Univers est homogène et isotrope»



~ 2 Millions de galaxies projetées sur la sphère céleste
~30 degrés de largeur, 2Glyr de profondeur

~ 2 Millions de galaxies en 3D
2Glyr de profondeur

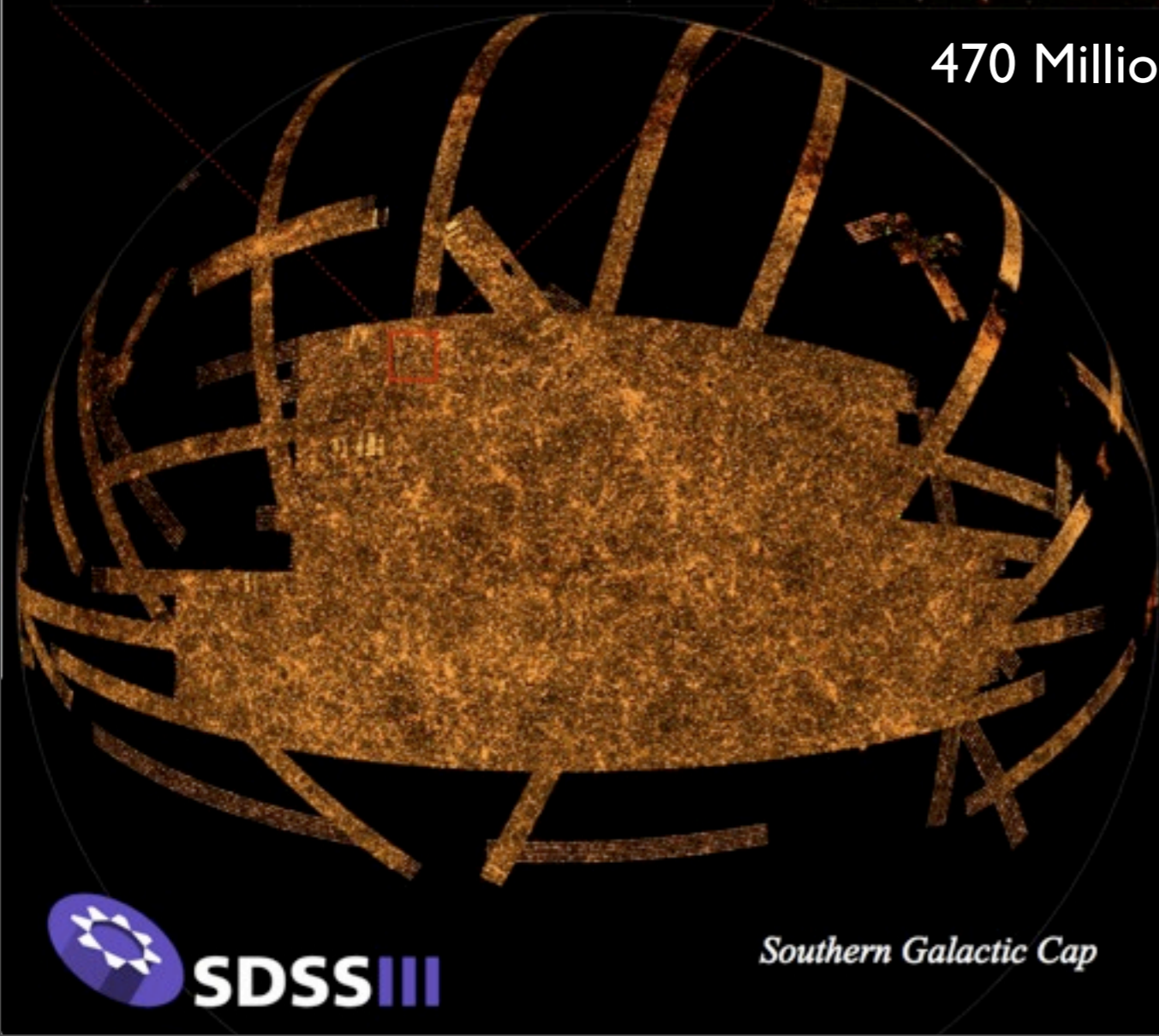
Janvier 2011

Messier 33

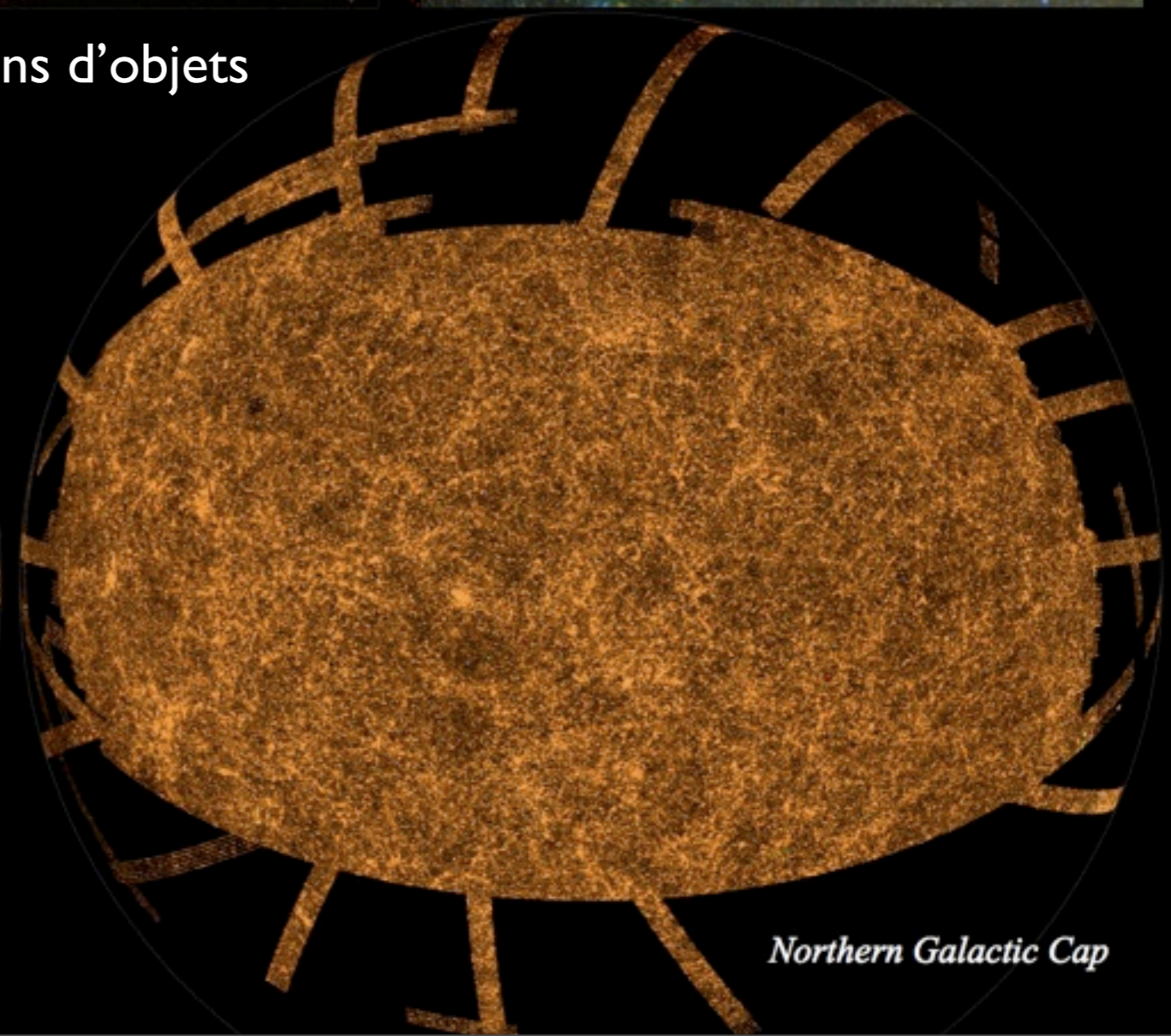
NGC 604



470 Millions d'objets



Southern Galactic Cap



Northern Galactic Cap

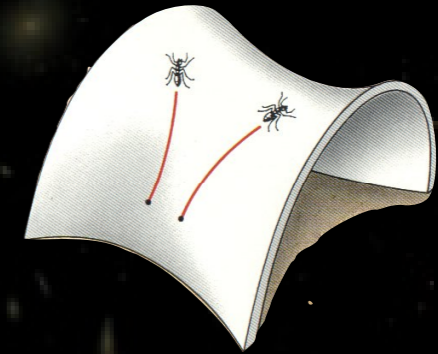
Évolution de l'Univers

- Le principe cosmologique permet de faire des hypothèses simples
- On peut donc calculer en RG l'évolution de l'échelle de l'Univers
 - ★ Univers dynamique
 - ★ Le taux d'expansion dépend du contenu de l'Univers
 - Matière ordinaire
 - Matière noire
 - Énergie sombre
 - ★ C'est ce que l'on appelle les paramètres cosmologiques: la recette de l'Univers
 - ★ Pour le mesurer on étudie en général l'évolution du taux d'expansion en observant des objets lointains

Paramètres cosmologiques

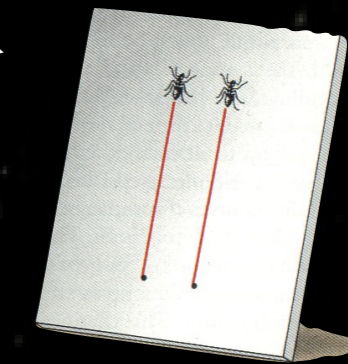
- Courbure de l'Univers: Ω_k

- ★ Négatif: Univers ouvert
- ★ zéro: Univers plat
- ★ Positif: Univers fermé



- Densité de matière: Ω_m

- ★ tend à courber l'Univers
- ★ ralentit l'expansion



- Densité d'énergie sombre: Ω_Λ

- ★ tend à courber l'Univers
- ★ accélère l'expansion

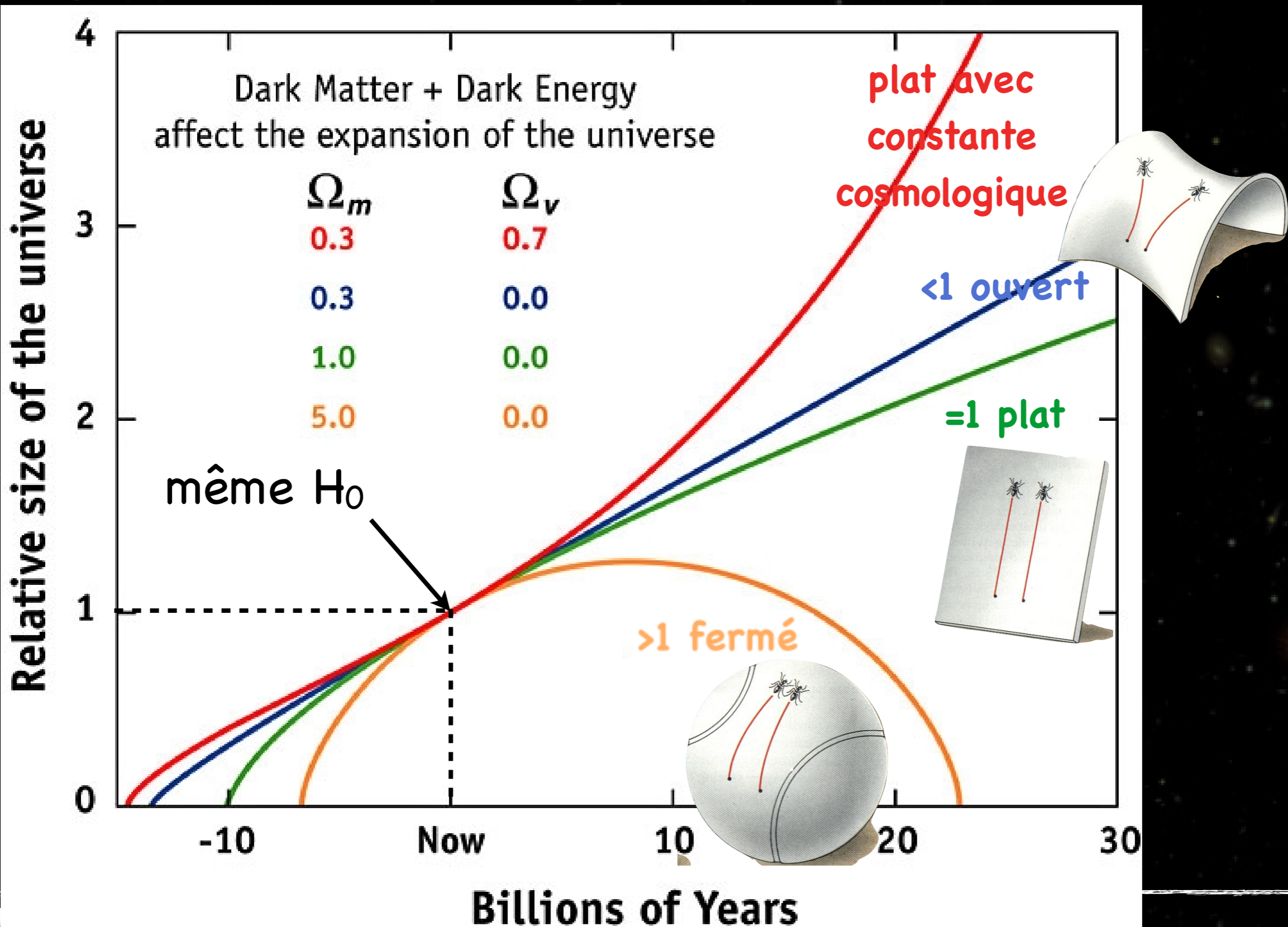


- Relation fondamentale:

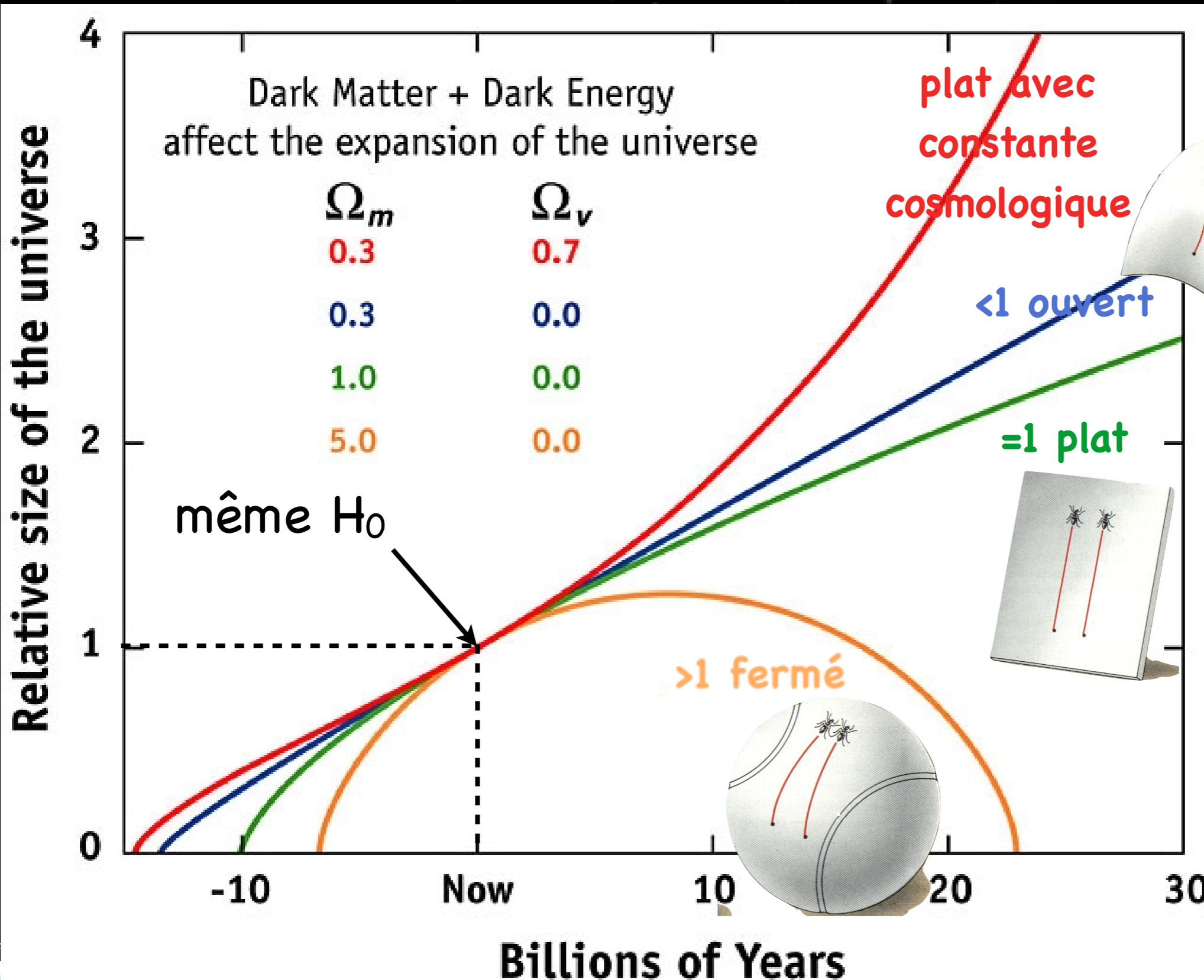
$$\Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$$

$$\text{Plat: } \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

Facteur d'échelle en FLRW

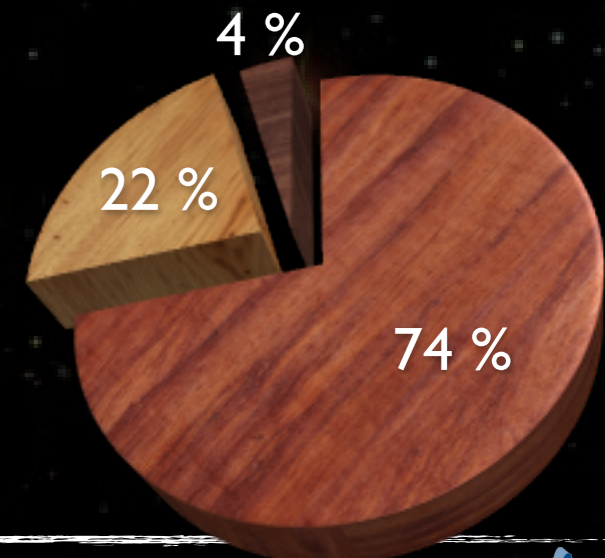


Facteur d'échelle en FLRW



Mesures actuelles
Courbure nulle

- Énergie sombre
- Matière noire
- Matière baryonique



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)
- En observant les traces de ces événements, on comprend l'histoire de l'Univers

Petite Histoire de l'Univers

temps



Fig: M. Lemoine

temps

Petite Histoire de l'Univers

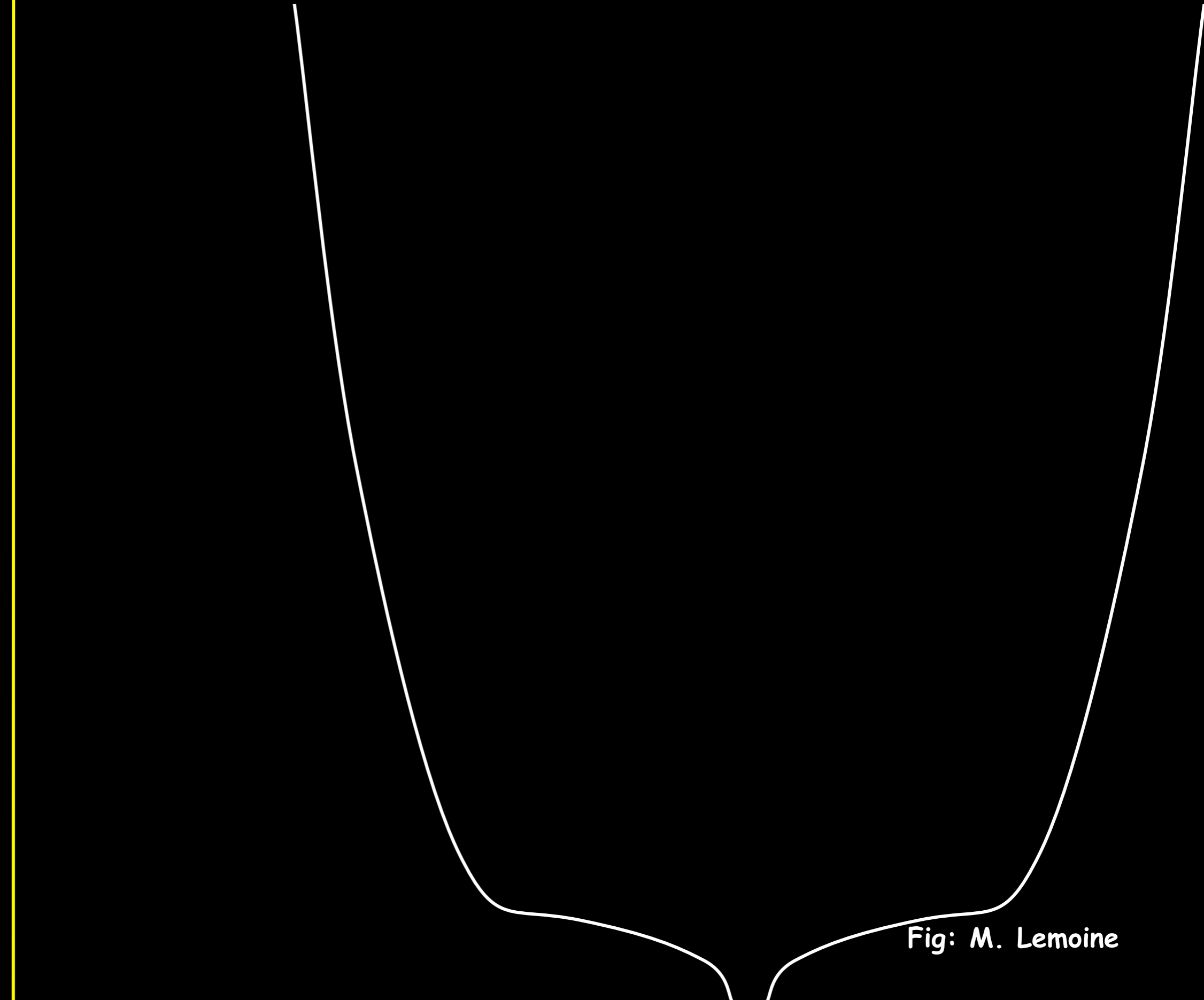


Fig: M. Lemoine

Petite Histoire de l'Univers

temps

fin inflation
début ère
rayonnement

10^{-33} sec

inflation

Fig: M. Lemoine



Petite Histoire de l'Univers

temps

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

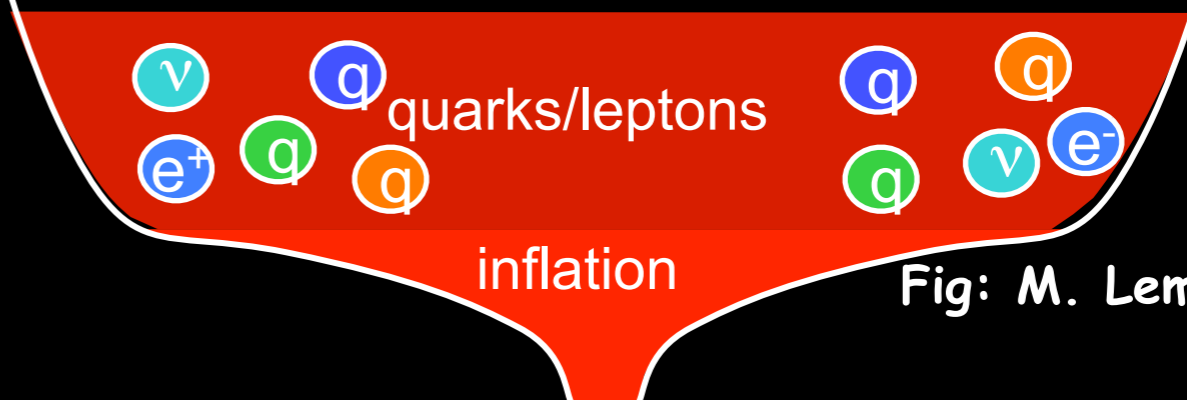


Fig: M. Lemoine

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

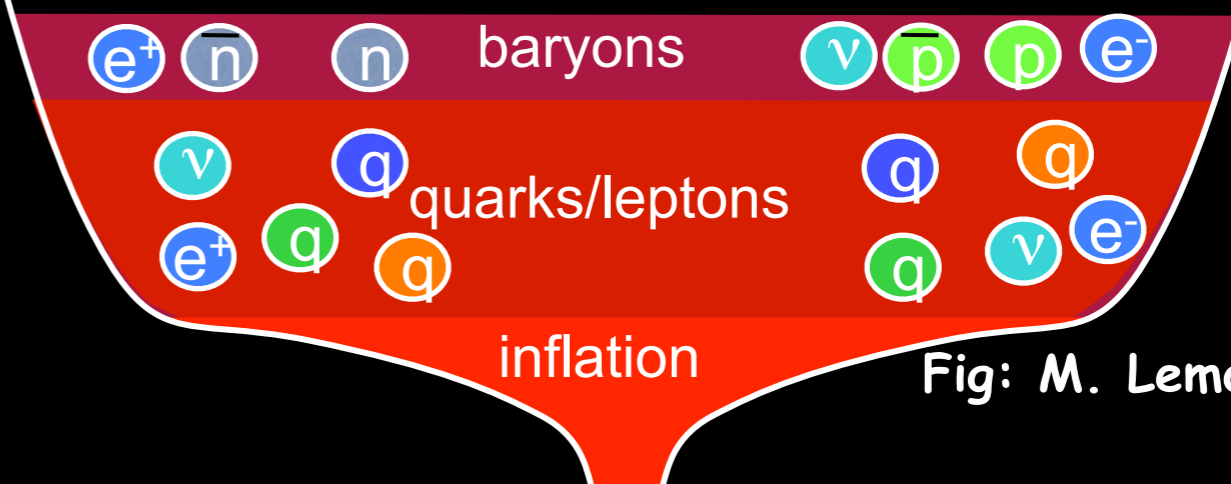


Fig: M. Lemoine

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

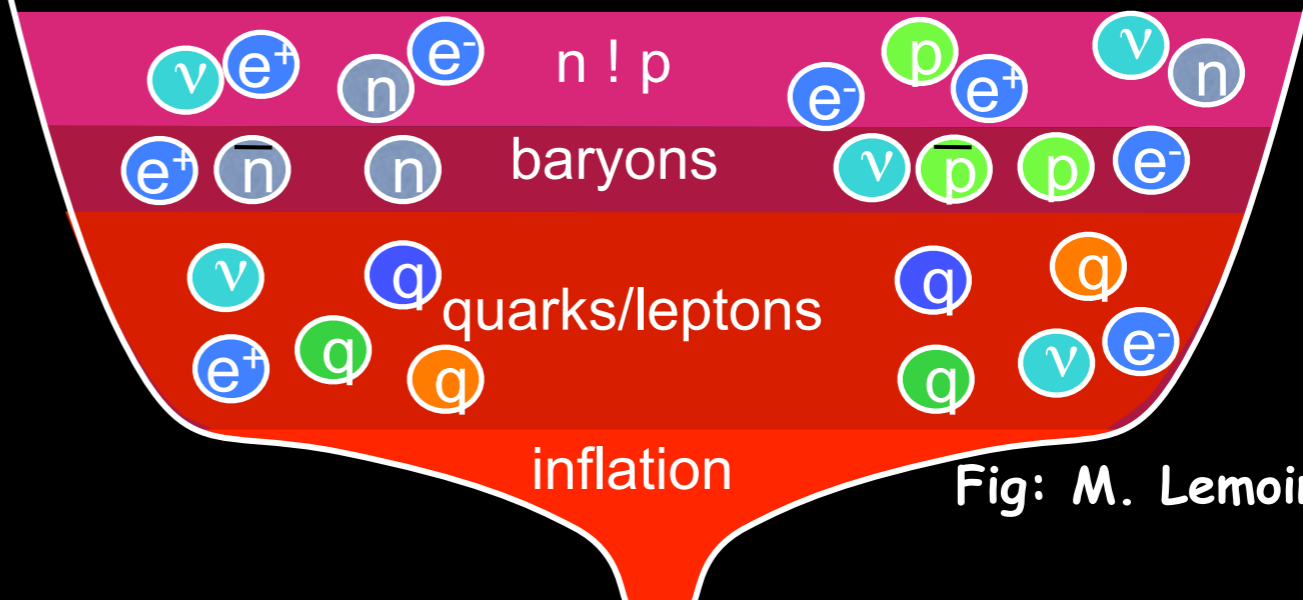


Fig: M. Lemoine

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

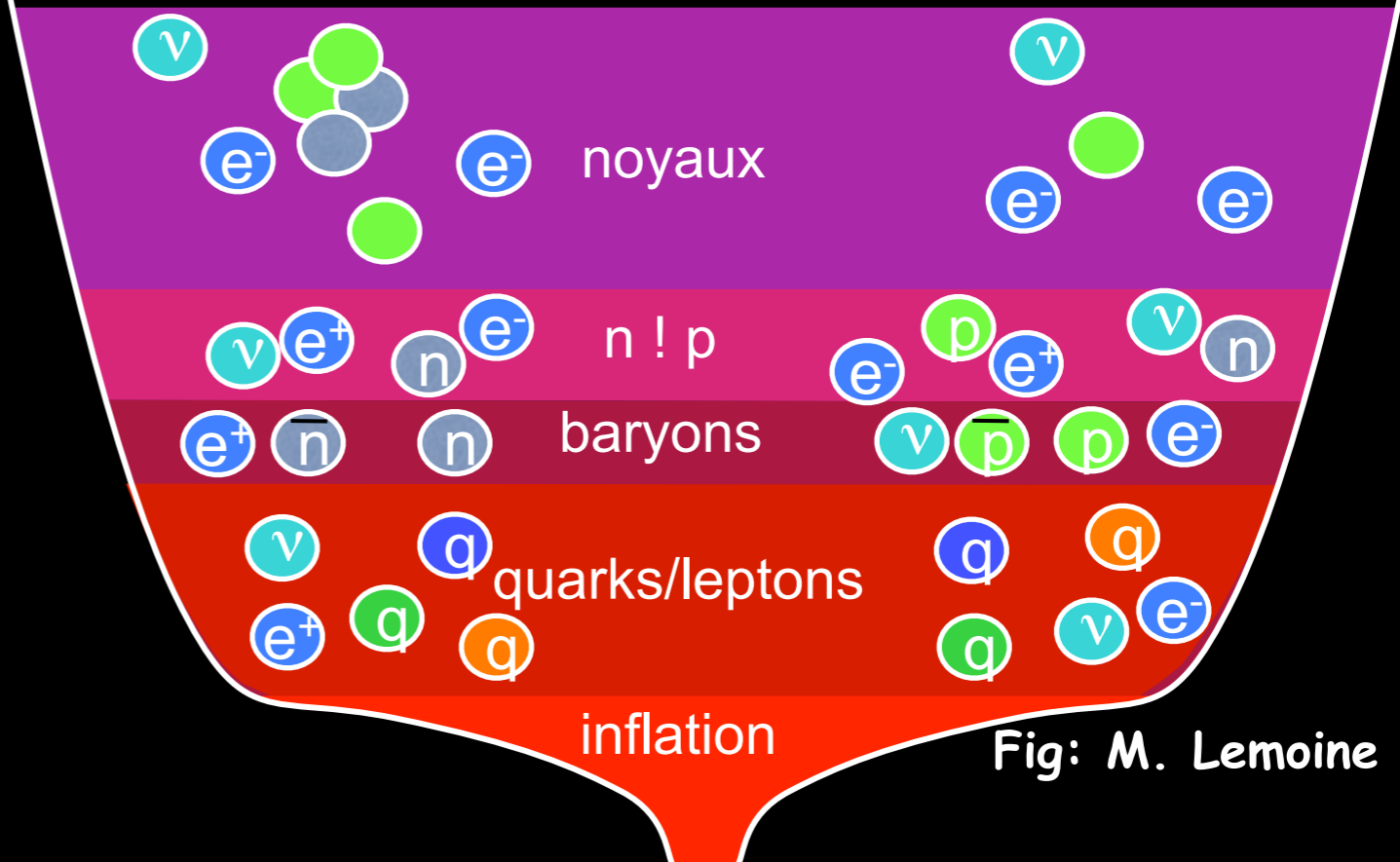


Fig: M. Lemoine

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

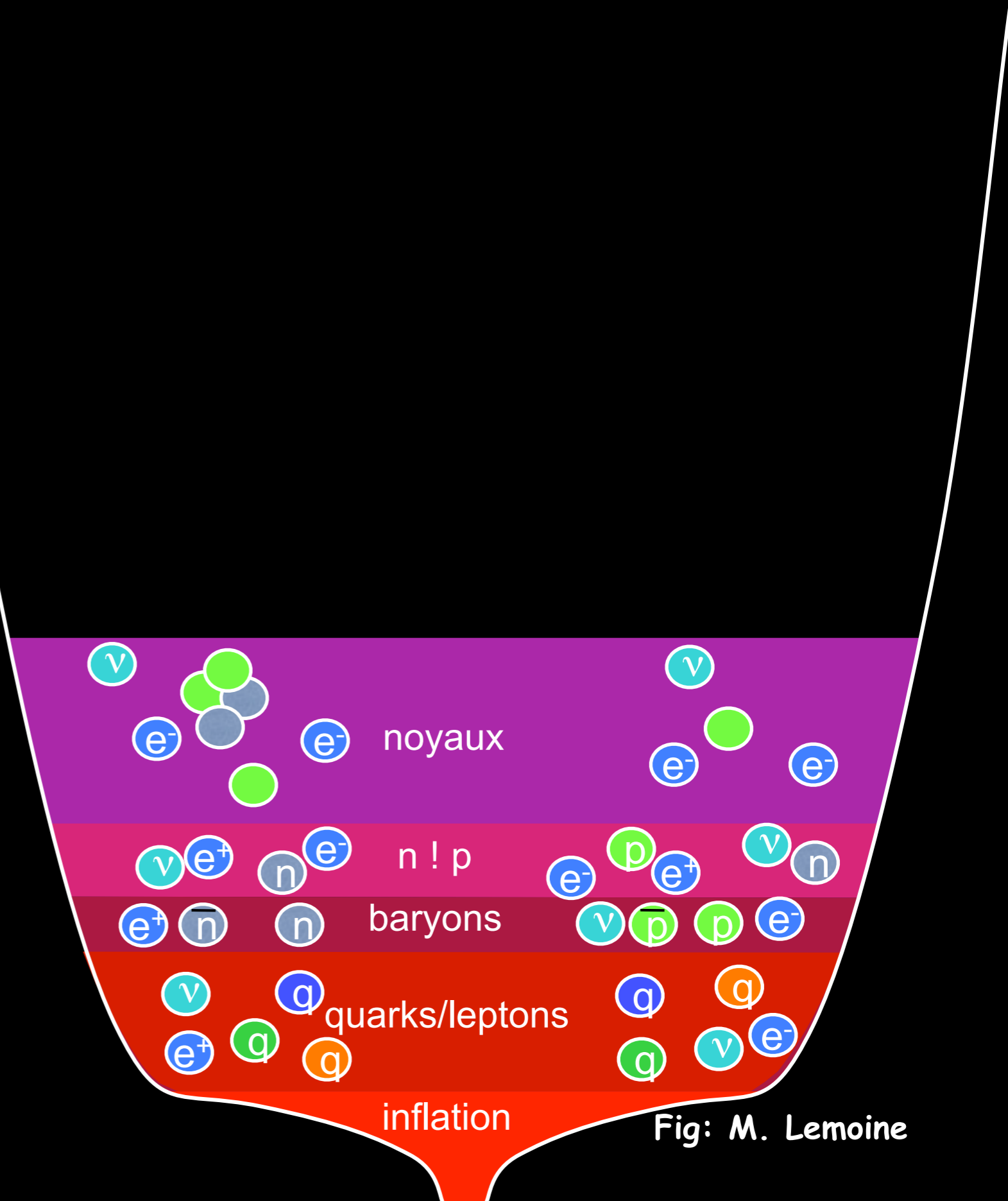


Fig: M. Lemoine

Petite Histoire de l'Univers

temps



dernière diffusion — 380 000 ans

égalité matière — 10 000 ans
rayonnement

nucléosynthèse primordiale — 3 mn

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

confinement quarks — 10^{-6} sec

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

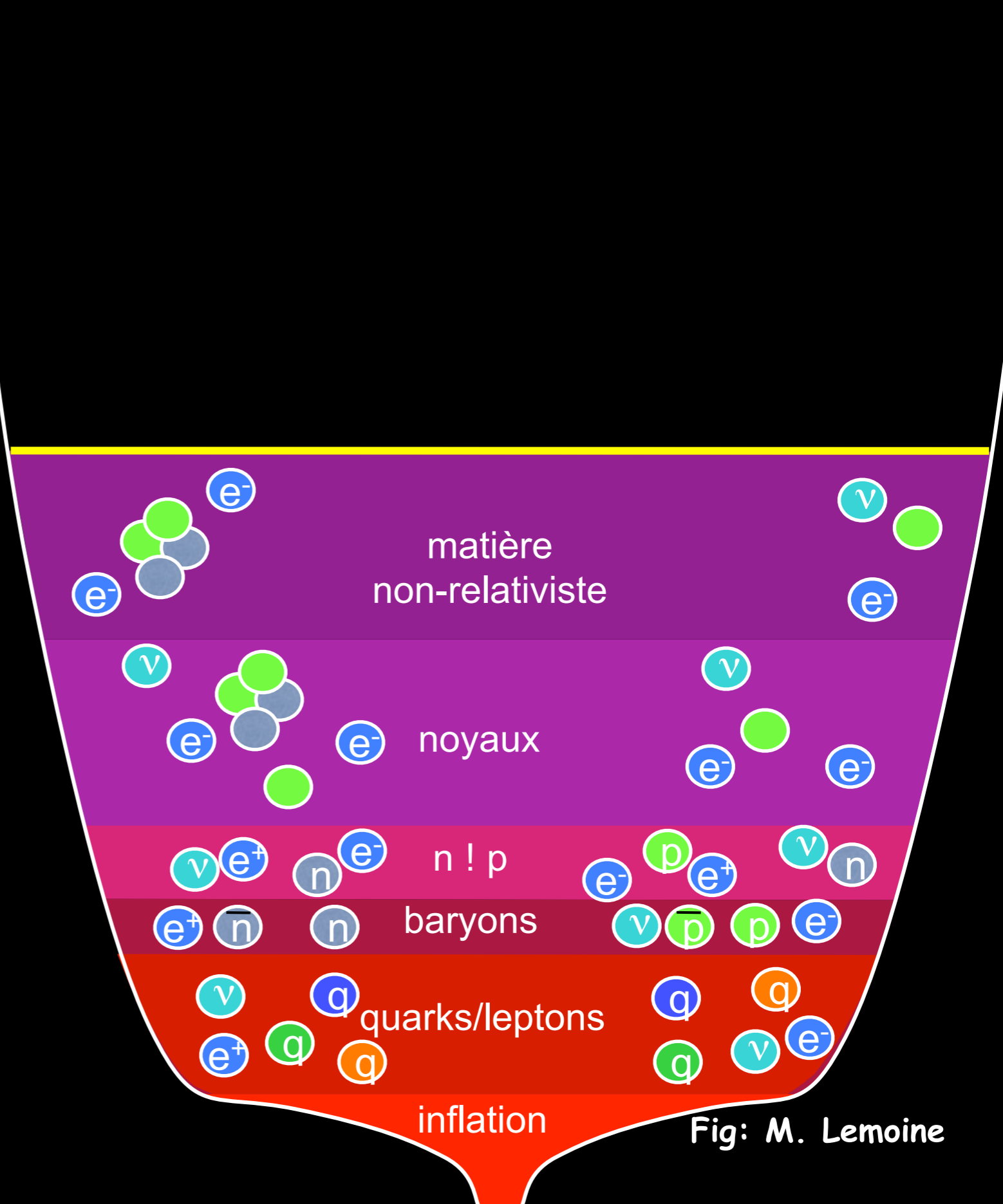
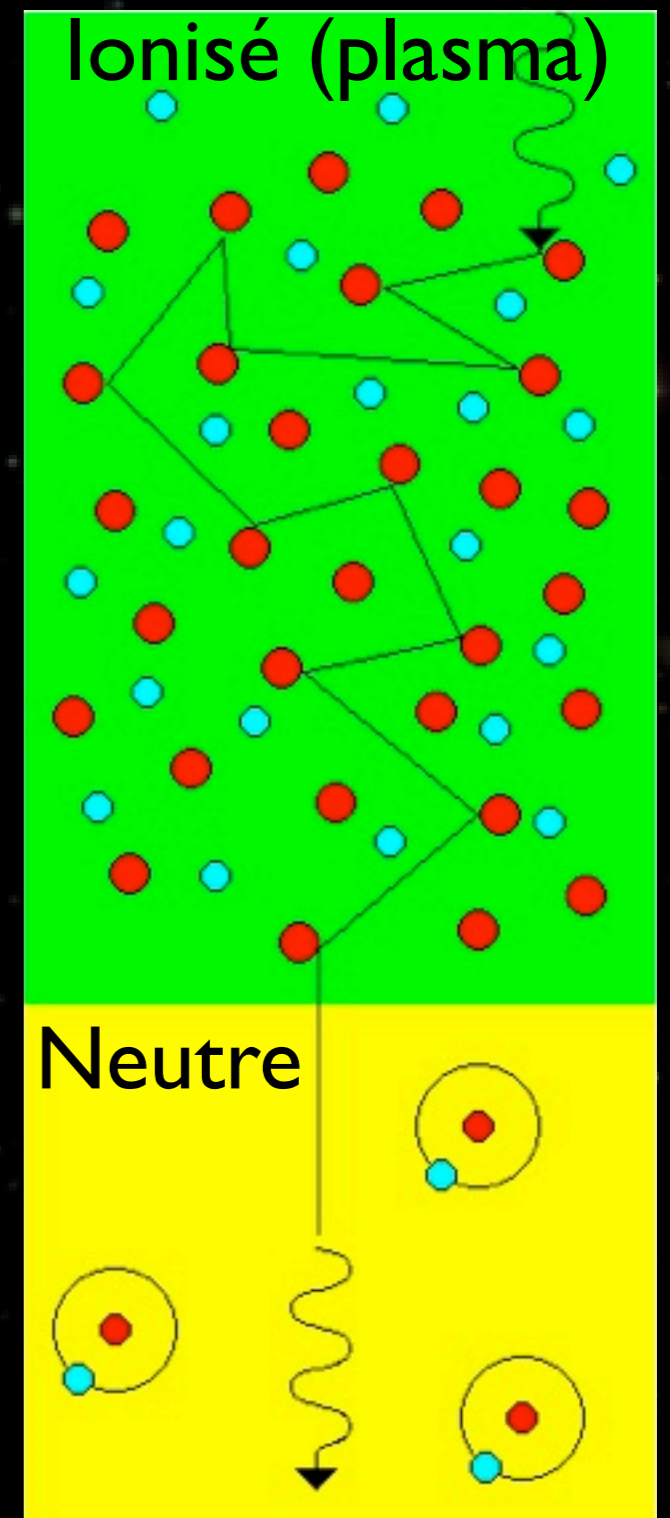


Fig: M. Lemoine

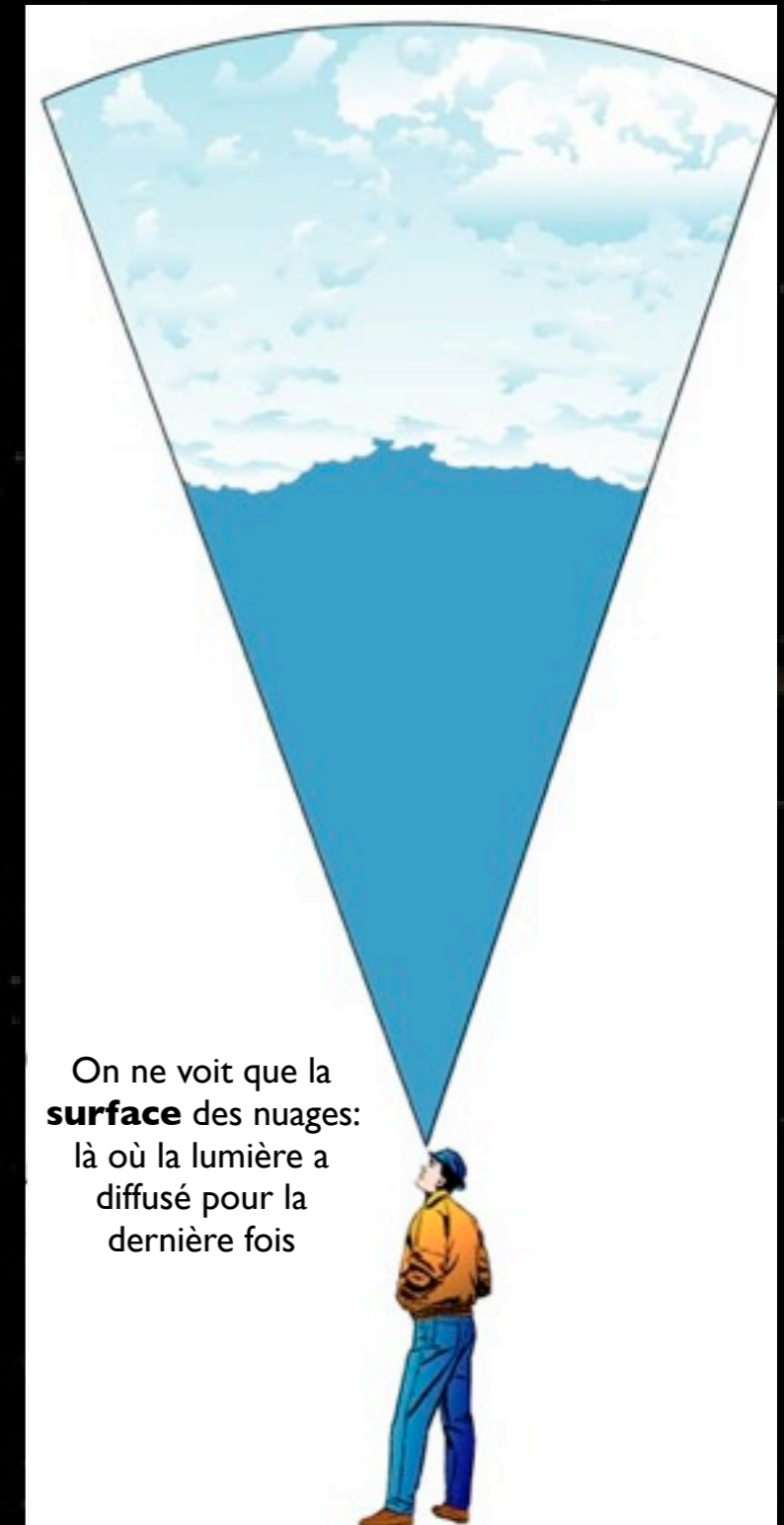
Découplage Matière-rayonnement

- 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



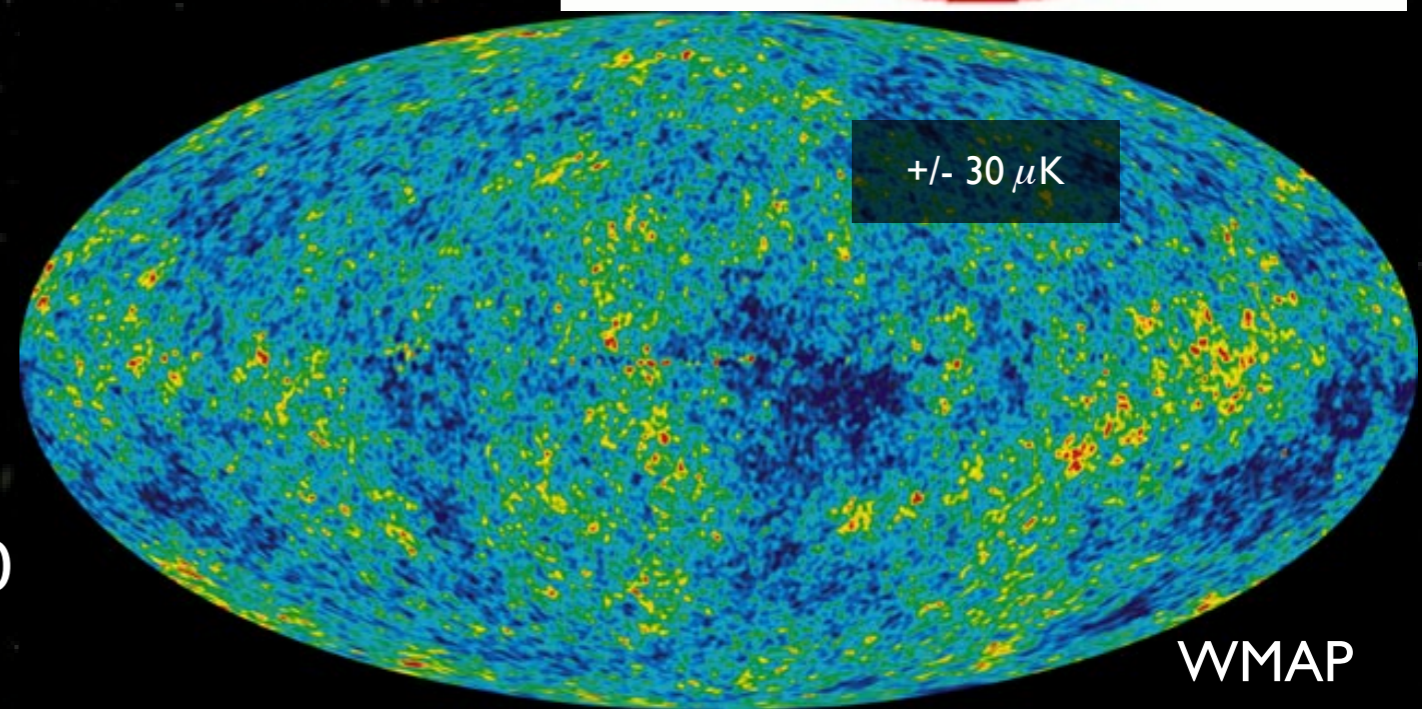
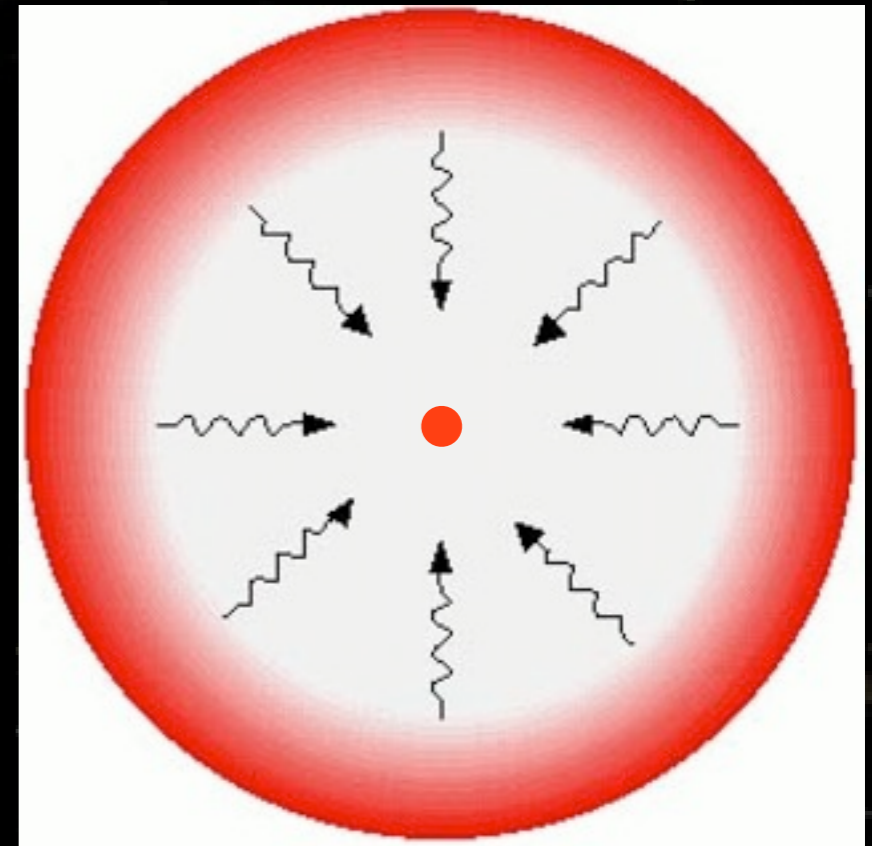
Découplage Matière-rayonnement

- 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



Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
 - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE



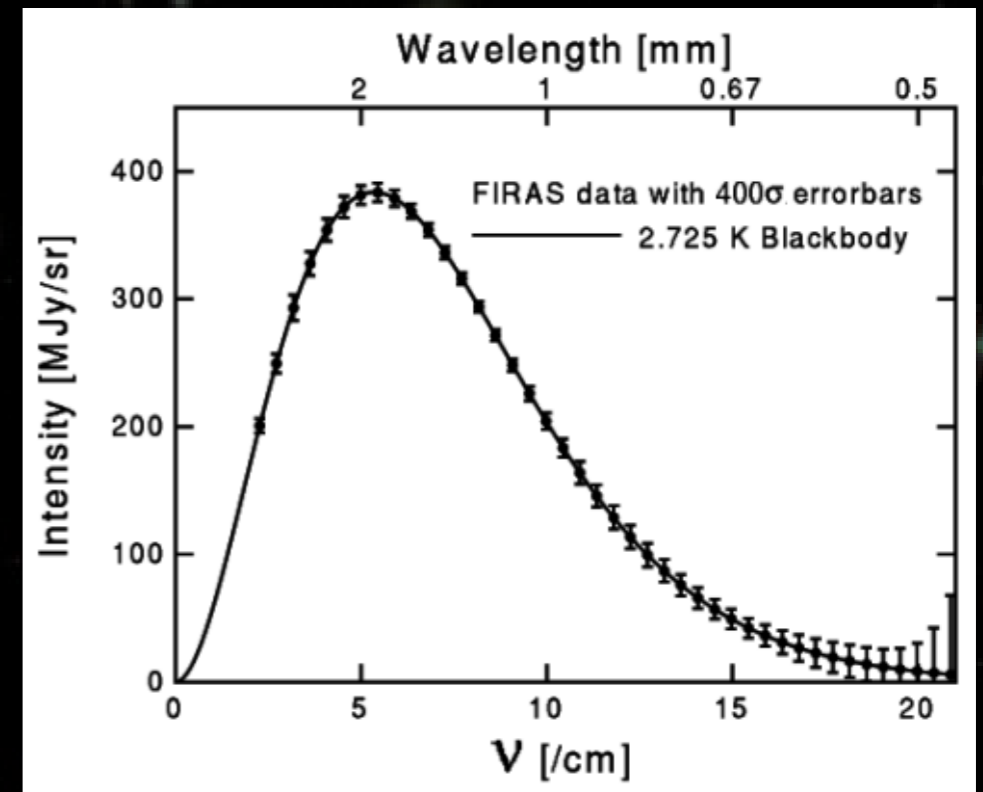
G. Gamow



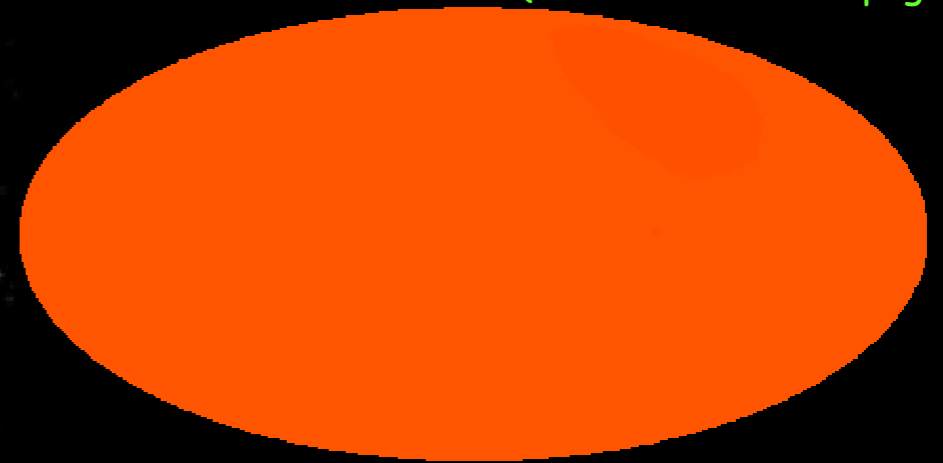
A. Penzias & R. Wilson

Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
 - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

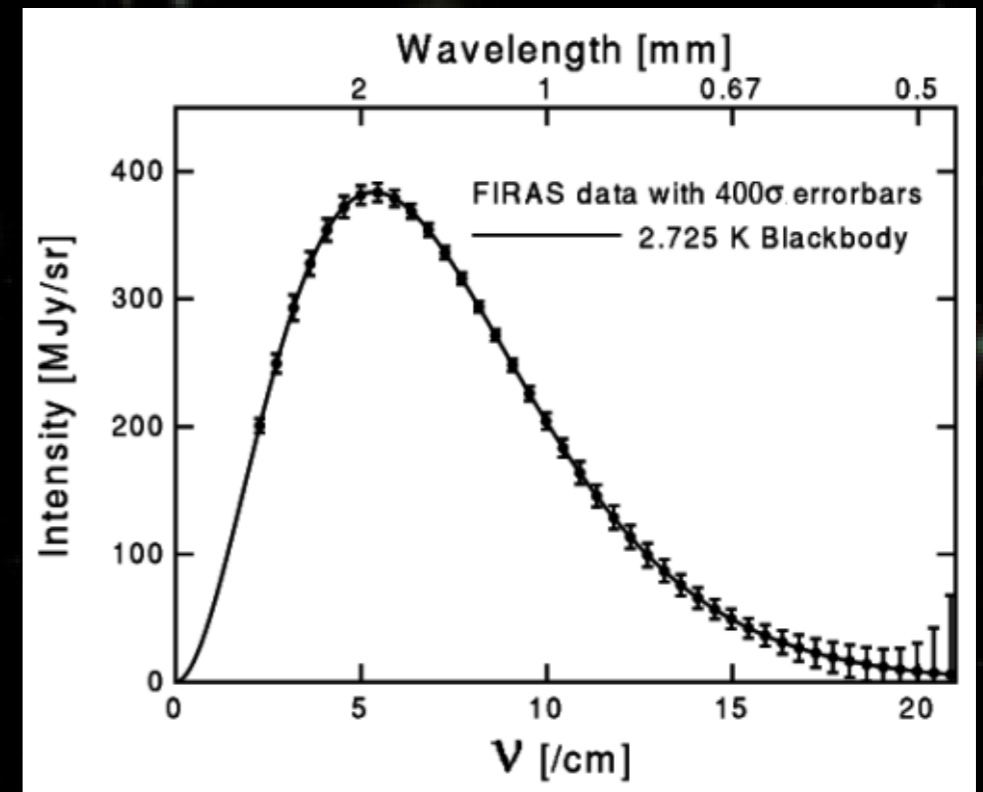


(COBE/DMR homepage)

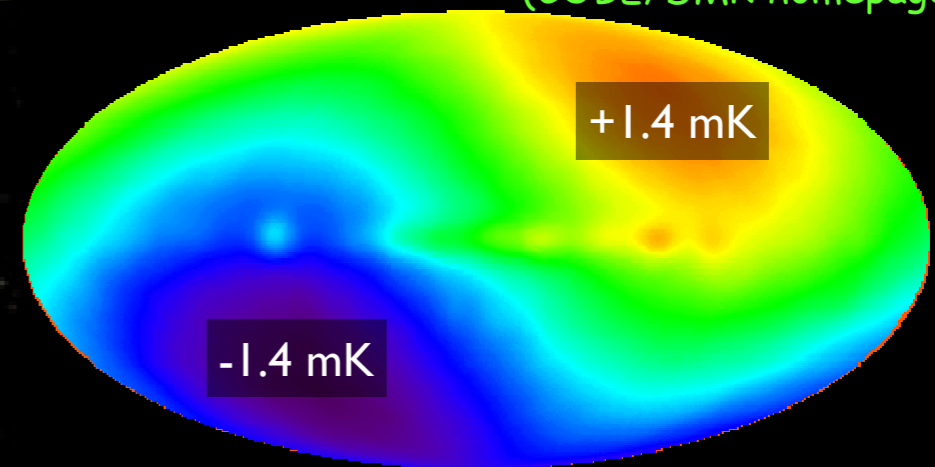


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
 - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

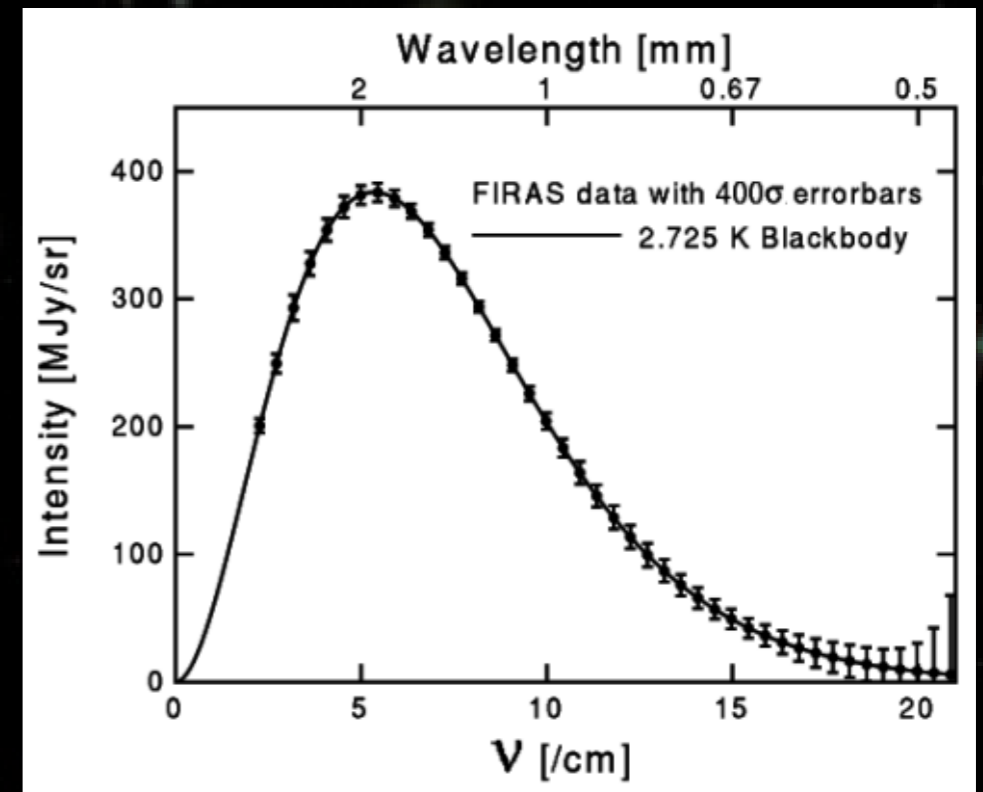


(COBE/DMR homepage)

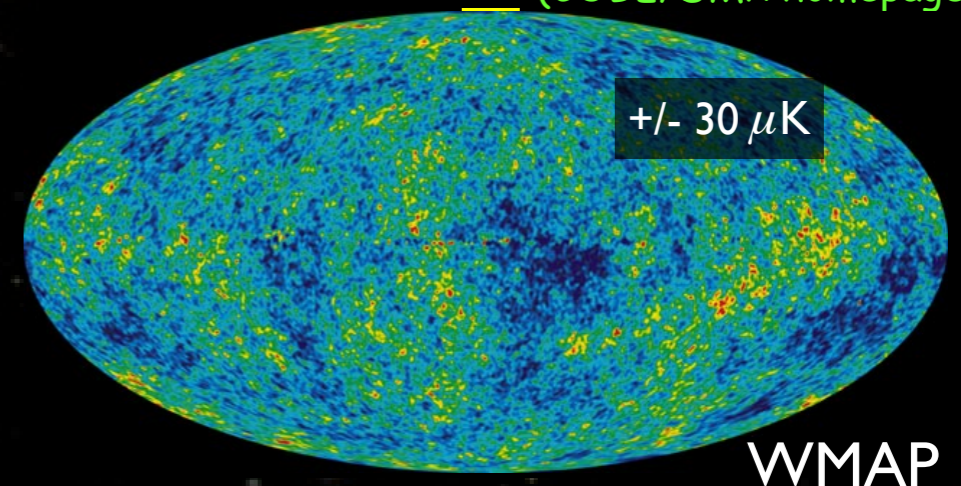


Le fond diffus cosmologique (CMB)

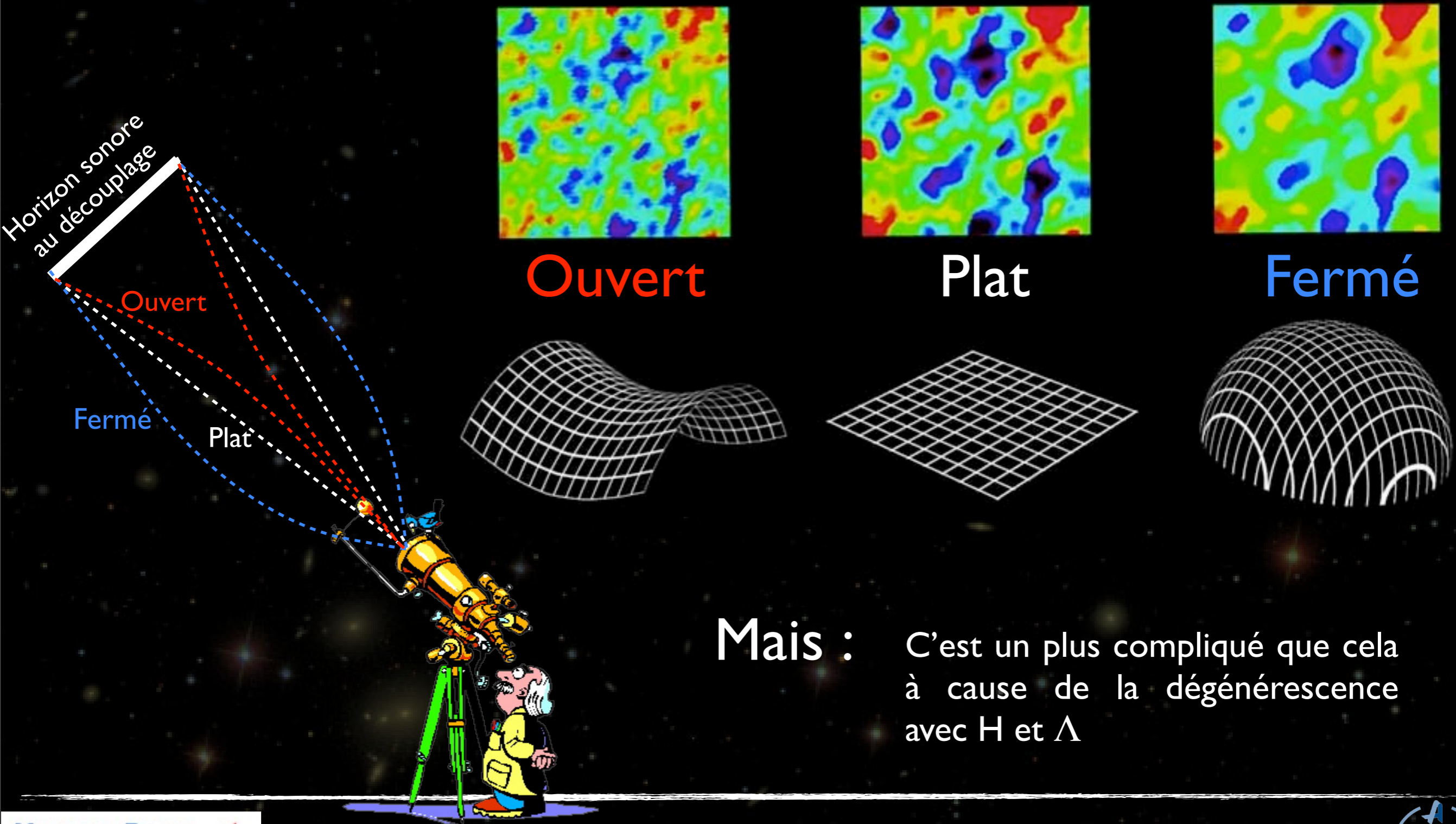
- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
 - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE



(COBE/DMR homepage)

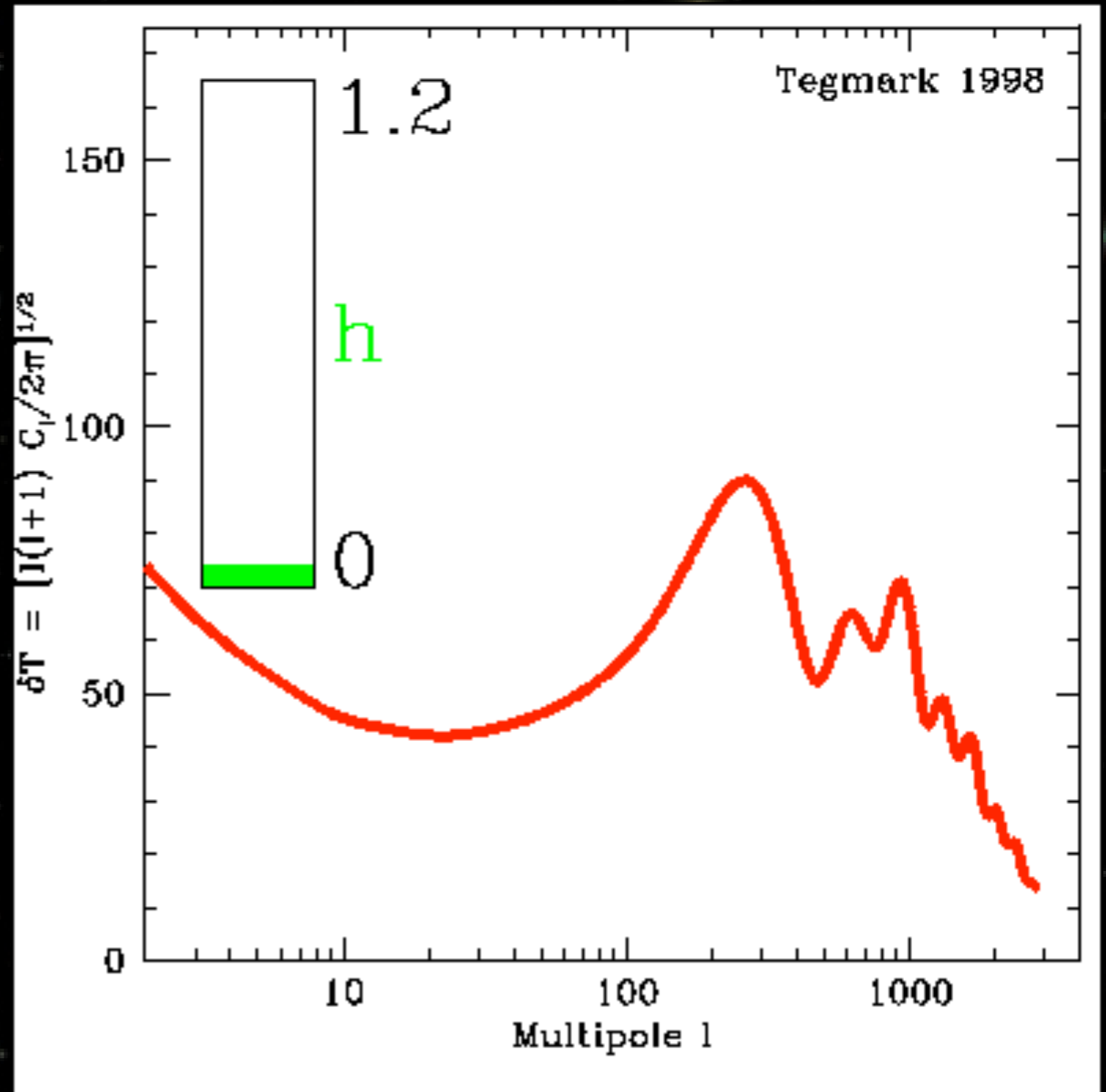
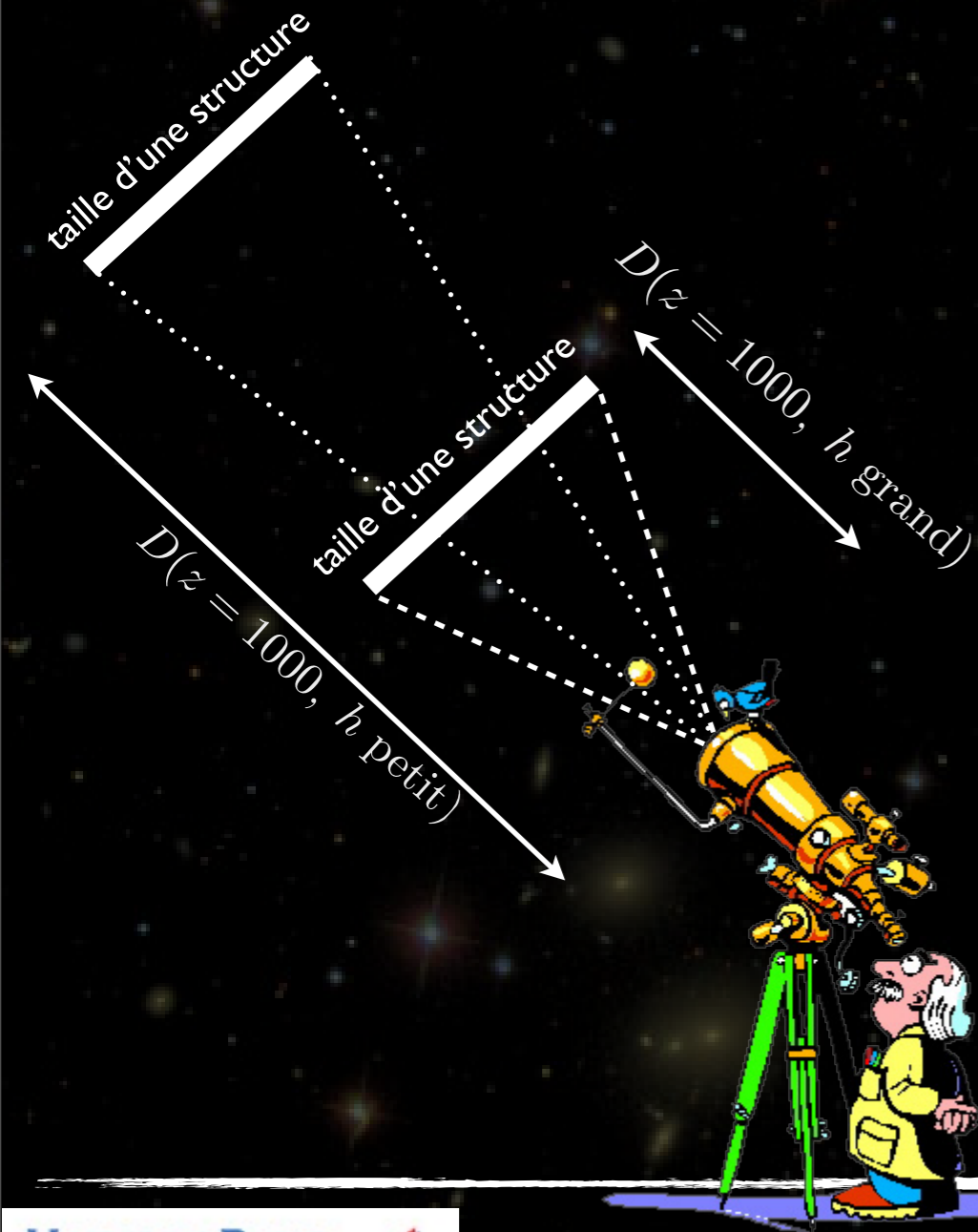


Influence de la géométrie de l'Univers



Constante de Hubble

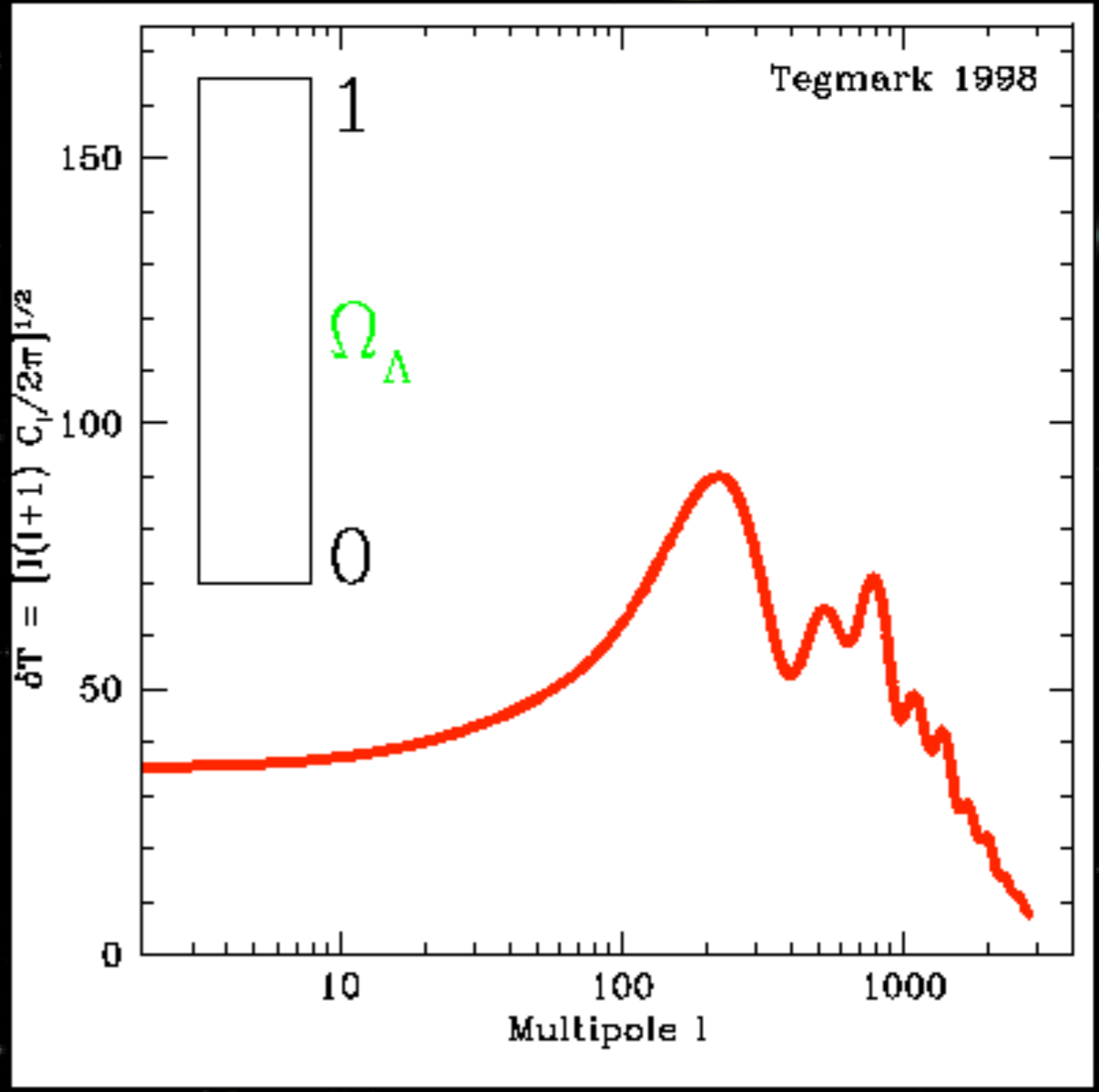
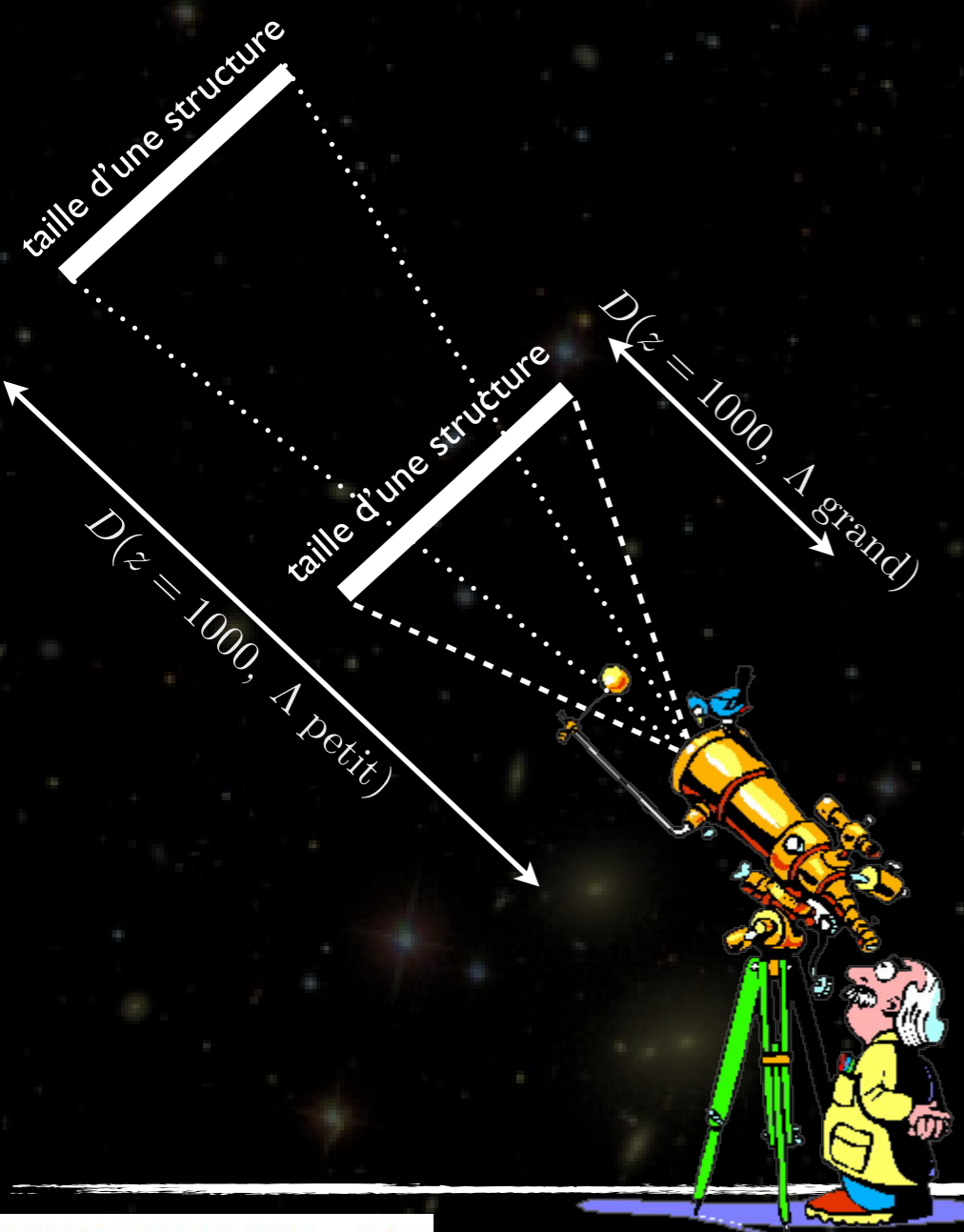
$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$



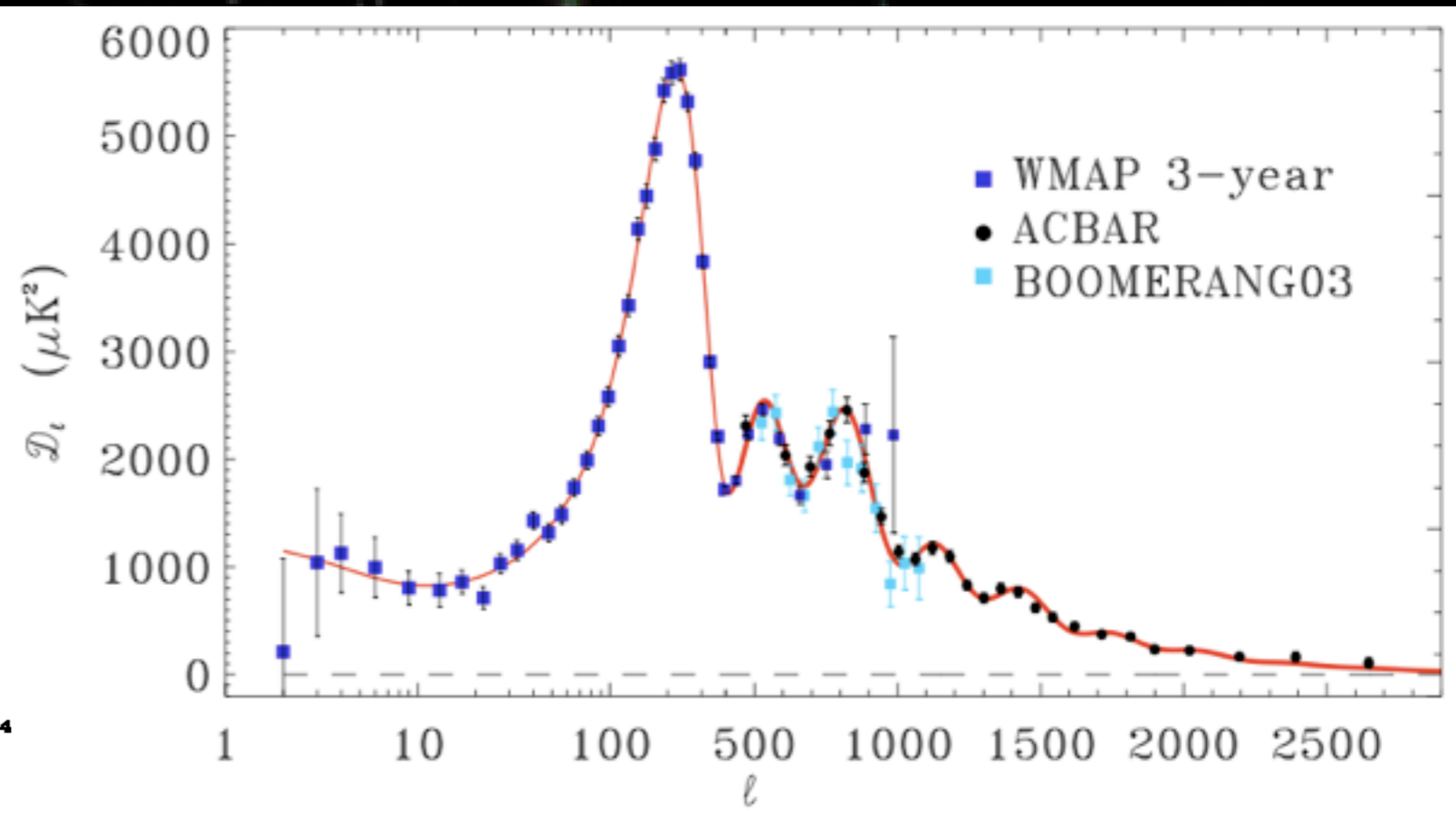
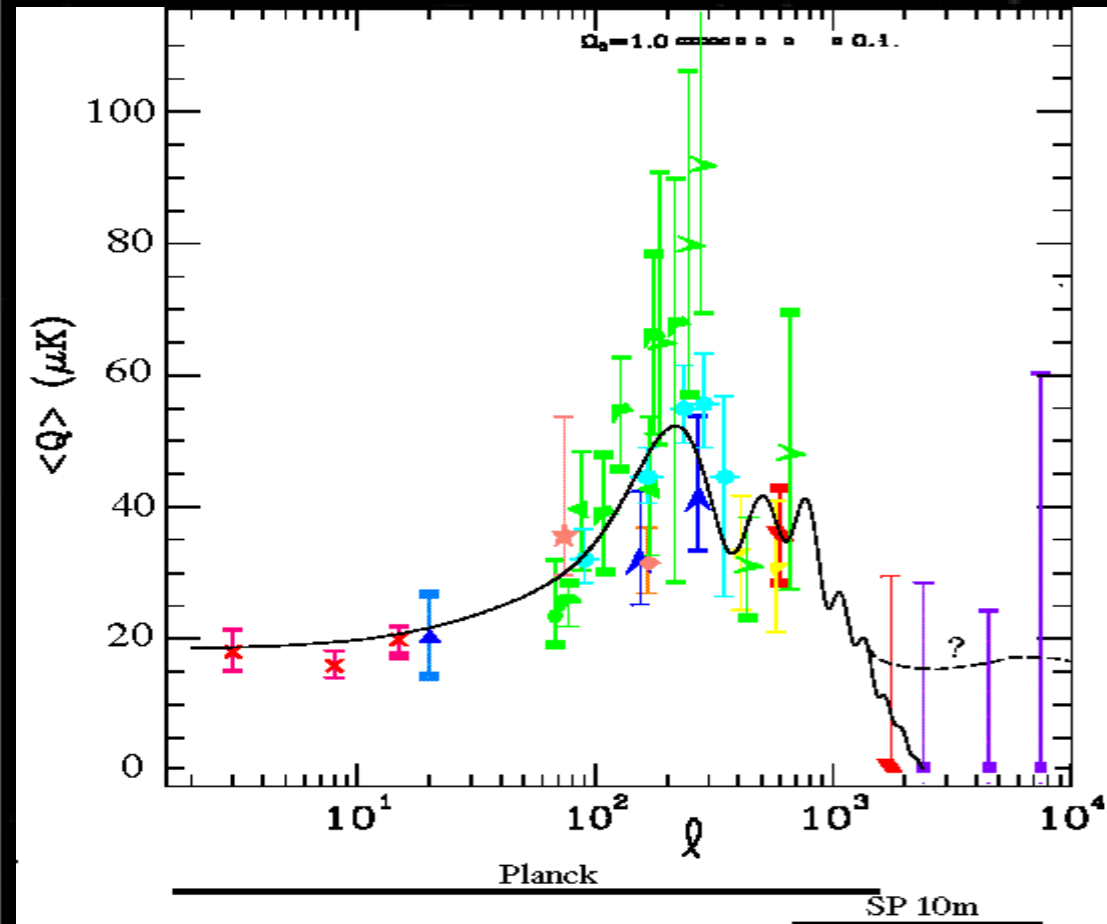
Énergie sombre

$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$

Λ accélère l'expansion



un domaine bouillonnant...



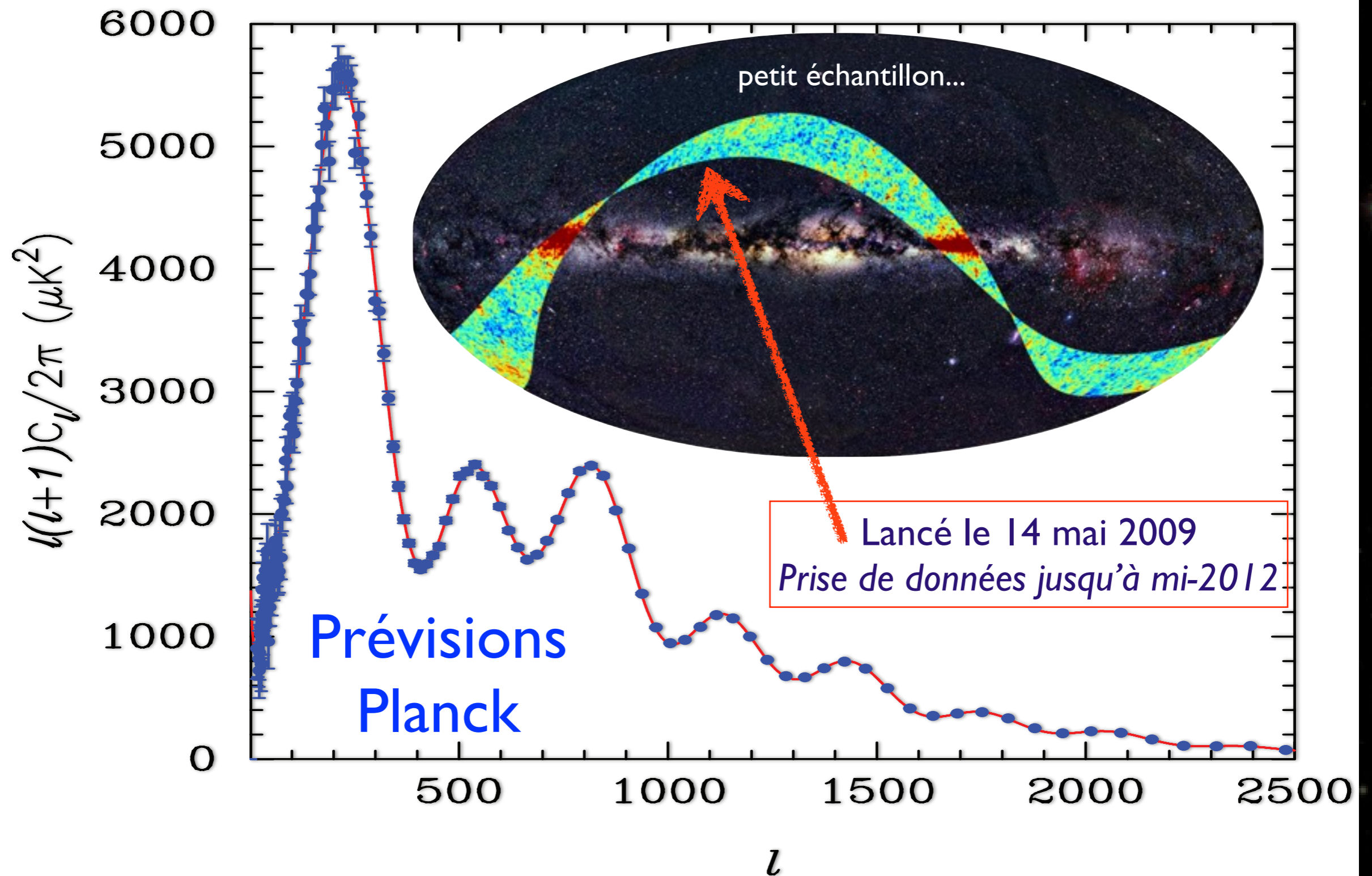
1999

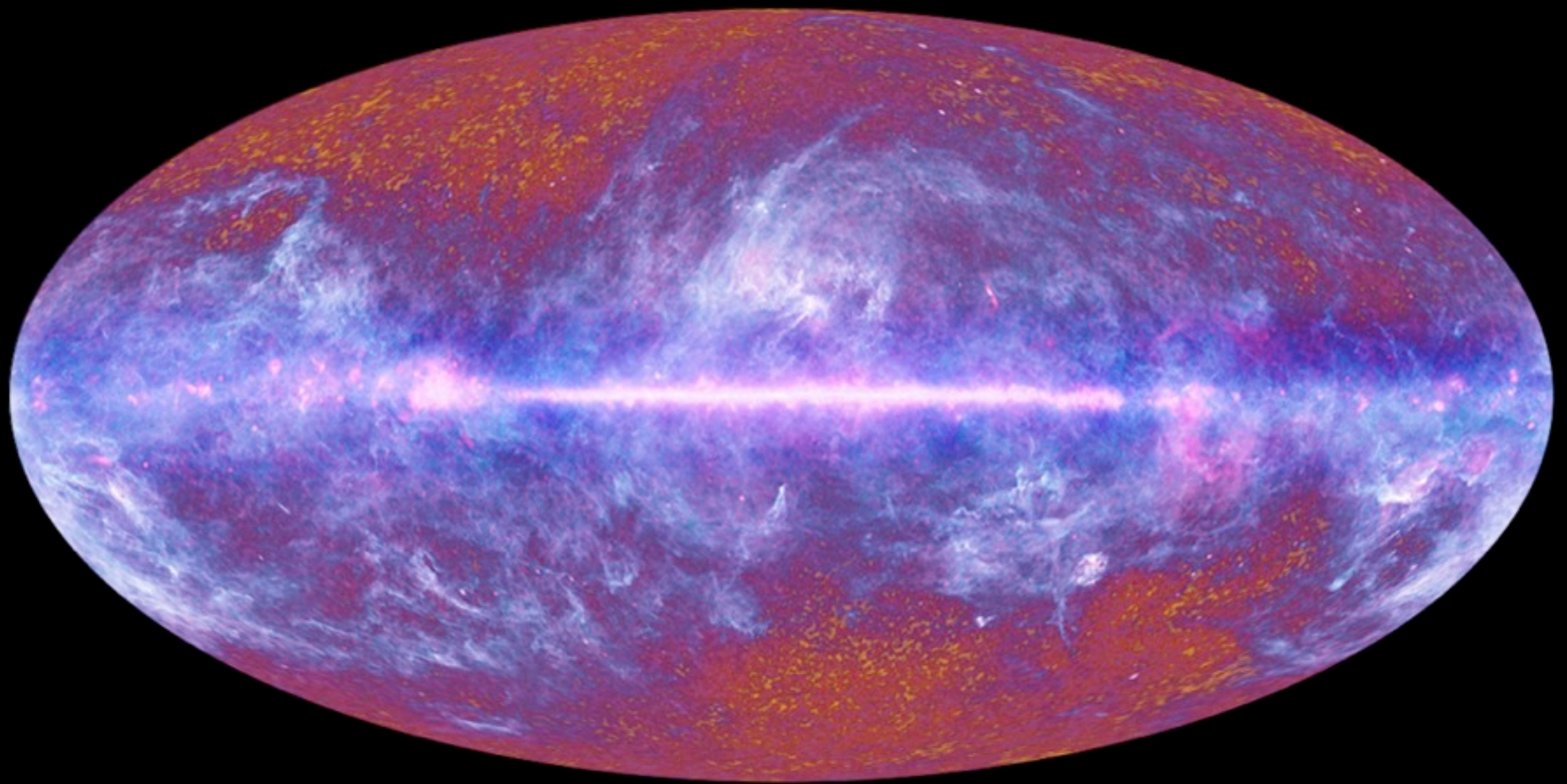
Immense succès : plusieurs milliers de points de mesures indépendants ajustés avec moins de 10 paramètres ...

Grâce à WMAP, mais surtout à l'apparition des bolomètres et à l'augmentation de leur nombre

2009

Le satellite Planck

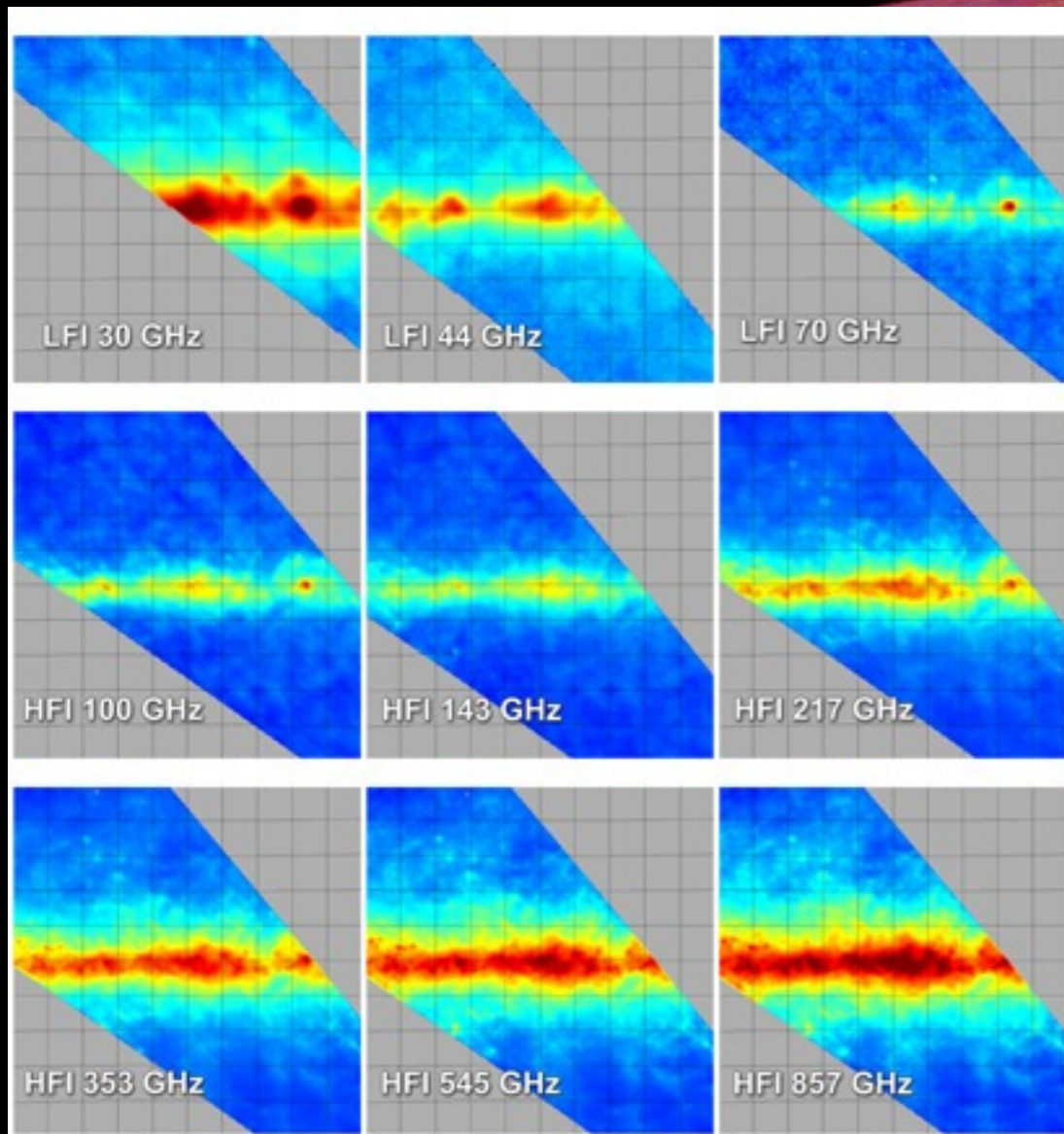
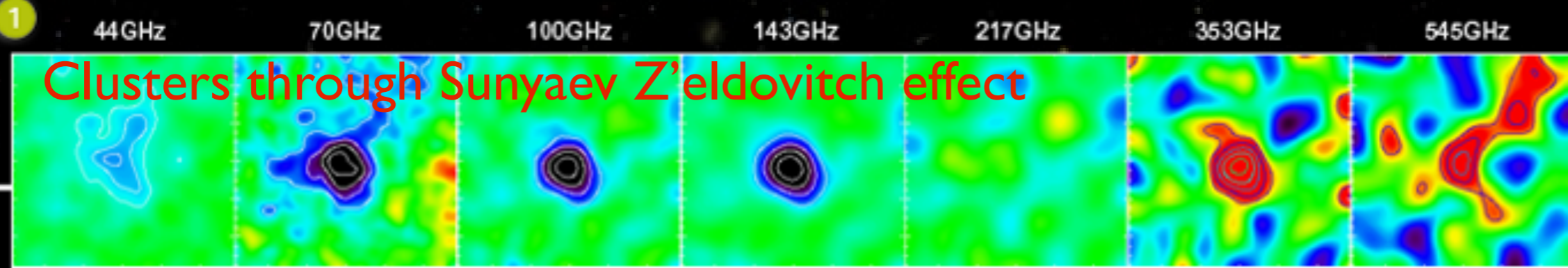




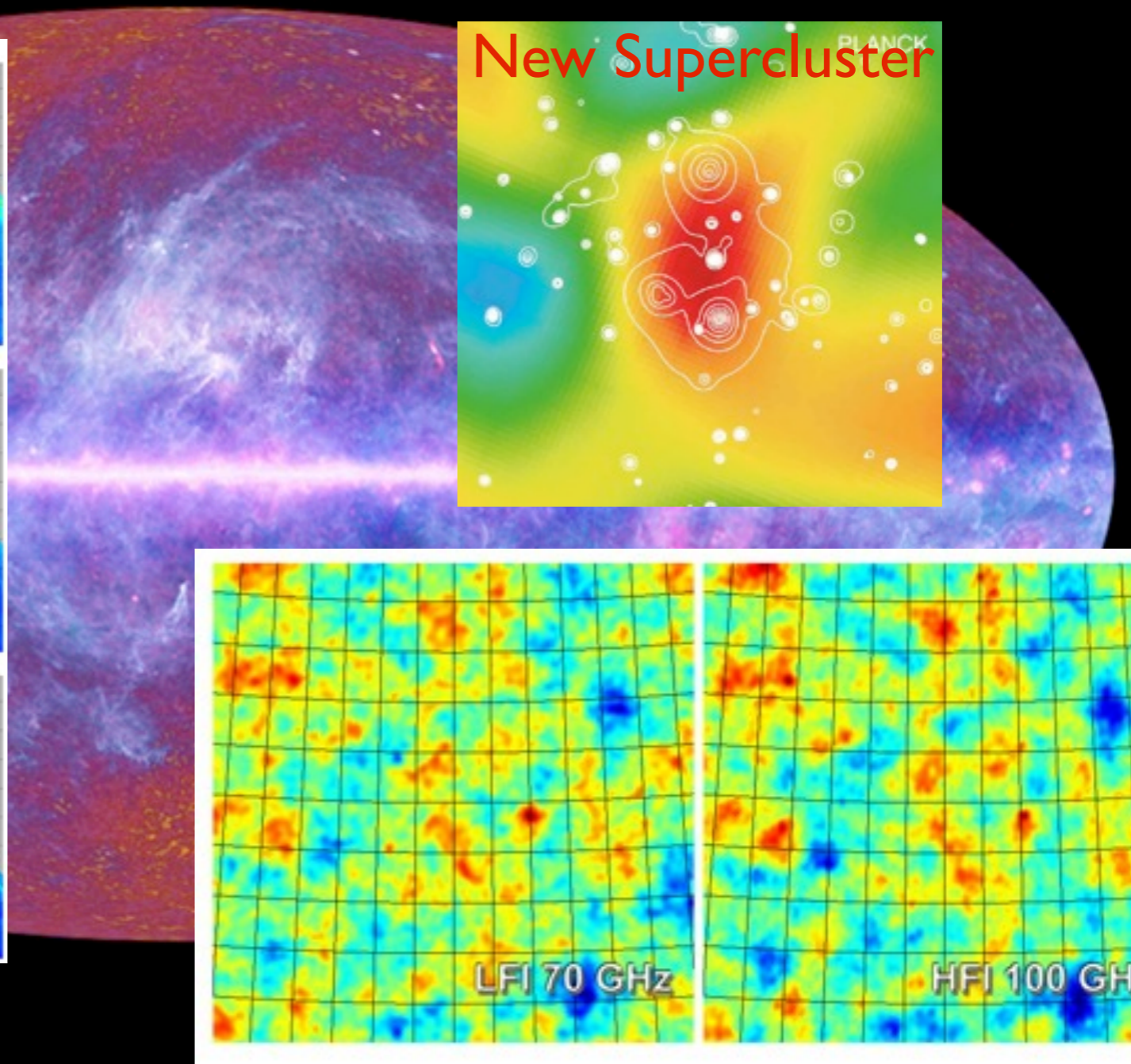
The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010



Galactic plane maps



CMB maps

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

$R = 6.0 \text{ Mpc}$

$z = 10.155$

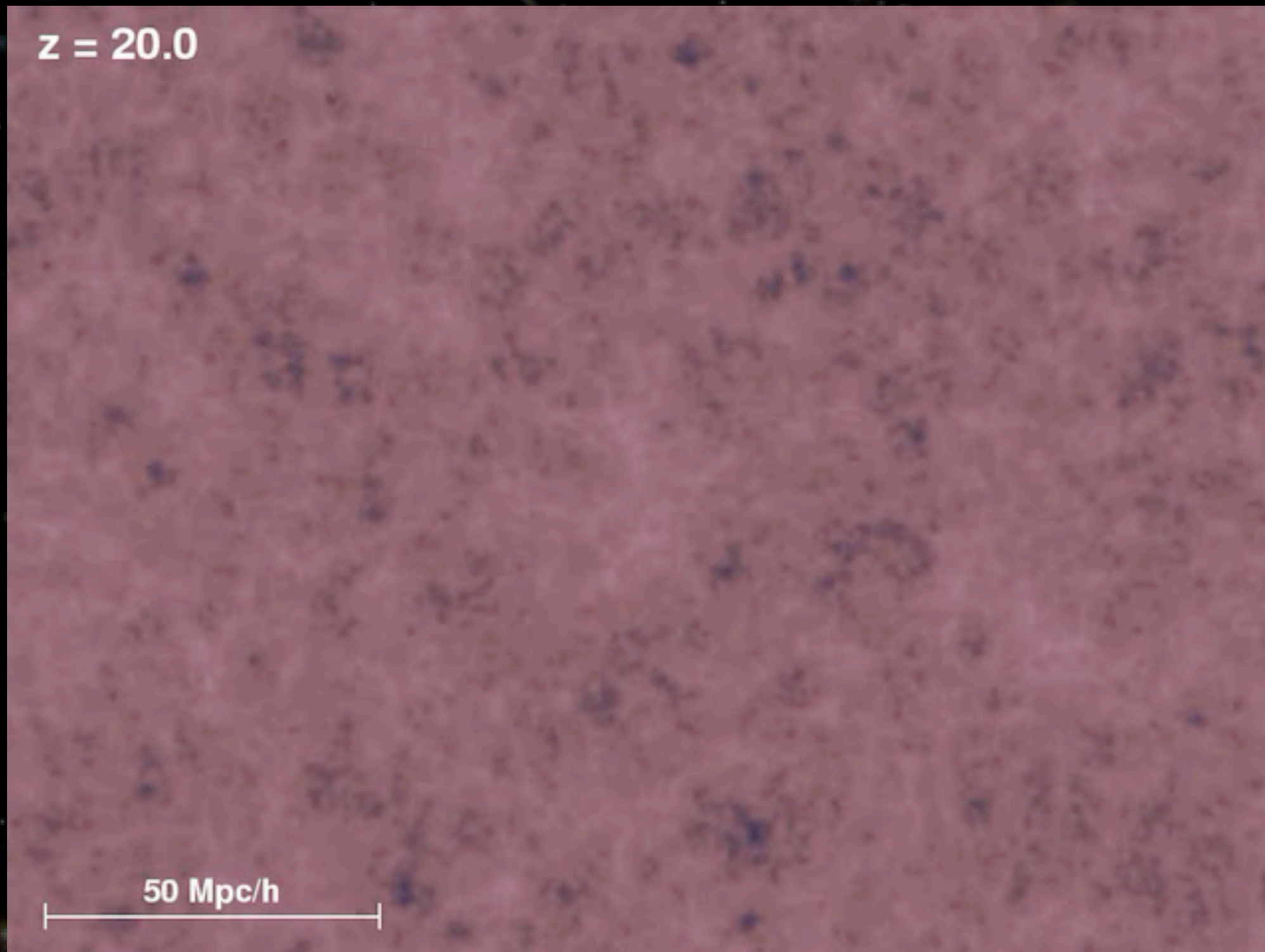


$a = 0.090$

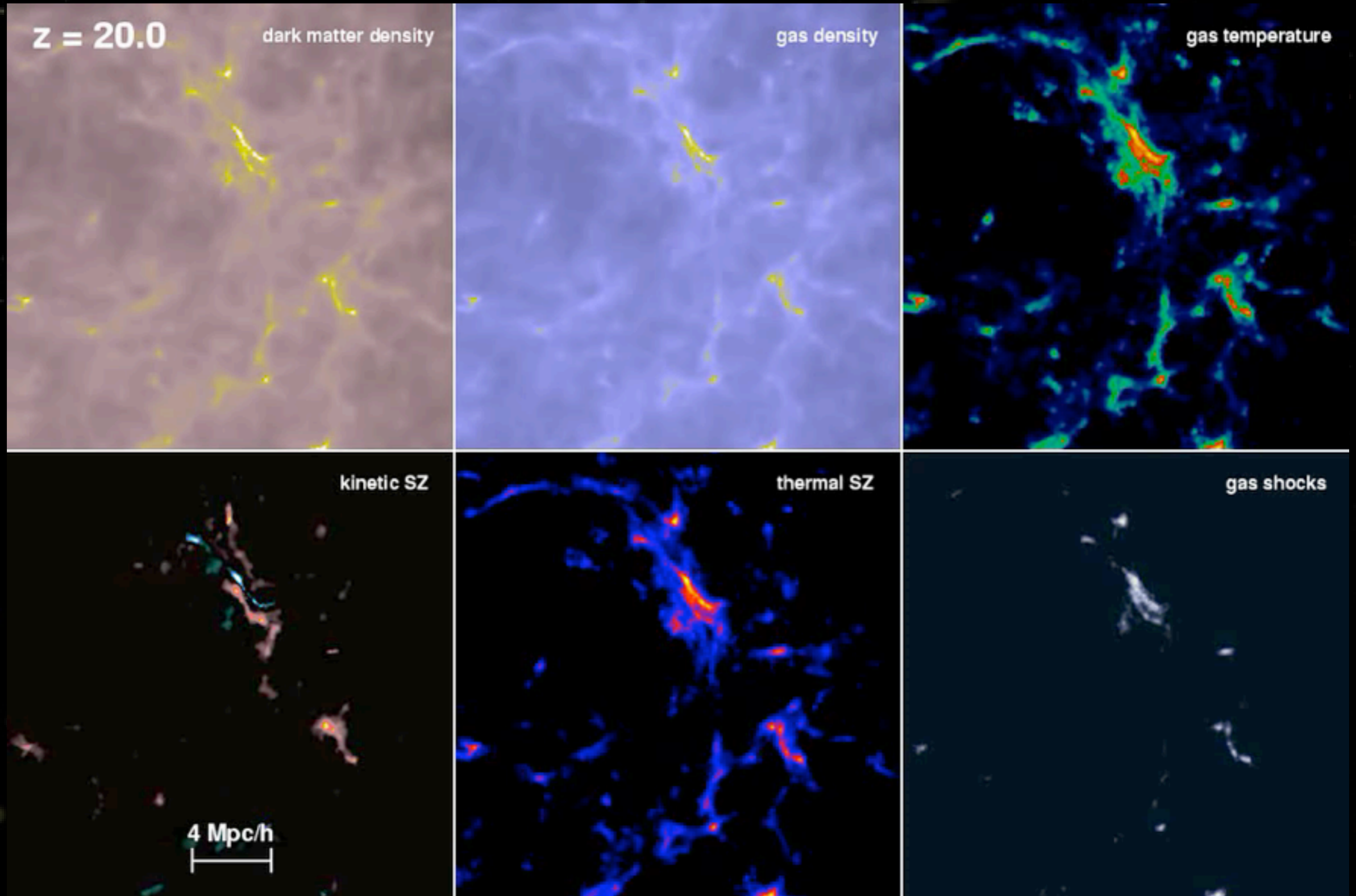
diemand 2003

Le taux de croissance des structures va dépendre des paramètres cosmologiques

Simulation N corps en coordonnées comobiles



Formation des amas (merging)



Fin du premier épisode

merci de votre attention !

Les fondements de la cosmologie actuelle



J.-Ch. Hamilton, APC

hamilton@apc.univ-paris7.fr

<http://www.apc.univ-paris7.fr/~hamilton/>

Introduction (suite et fin)

- **Modèle de la cosmologie «classique»: Big-Bang**
 - ★ beau succès
 - ★ mais trop simple car trop «lisse»
- **Cosmologie moderne:**
 - ★ Comprendre les structures observées (inflation ?)
 - ★ Comprendre les espèces mystérieuses (matière et énergie noires)
 - ★ Comprendre l'Univers primordial
- **Cette conférence tentera d'aborder tous ces points**

Les grandes questions en cosmologie moderne

● Contenu de l'Univers

★ Qu'est-ce que la matière noire ?

- bug observationnel ? probablement pas ...
- Particules inconnues («supersymétriques» ?)
- Gravité modifiée ?

★ Qu'est-ce que l'énergie sombre ?

- Bug Observationnel ? probablement pas ...
- Constante cosmologique ? (propriété de la gravitation ou énergie du vide ?)
- Bug théorique ? en fait la gravité est différente de ce qu'on croit
- autre chose ?

● Histoire de l'Univers

★ Quand et comment se sont formés les premiers objets ?

★ D'où viennent les fluctuations primordiales ? Y a-t-il eu inflation ?

● Univers très primordial

★ Quelle théorie près de la singularité ? cordes ? gravité quantique ?

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 qqes 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

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

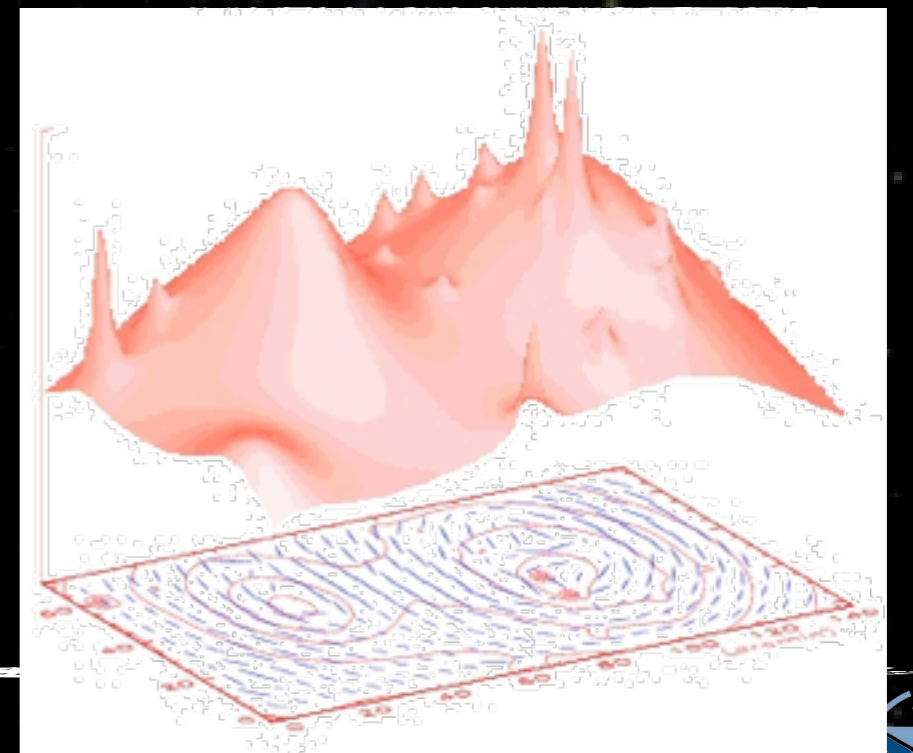
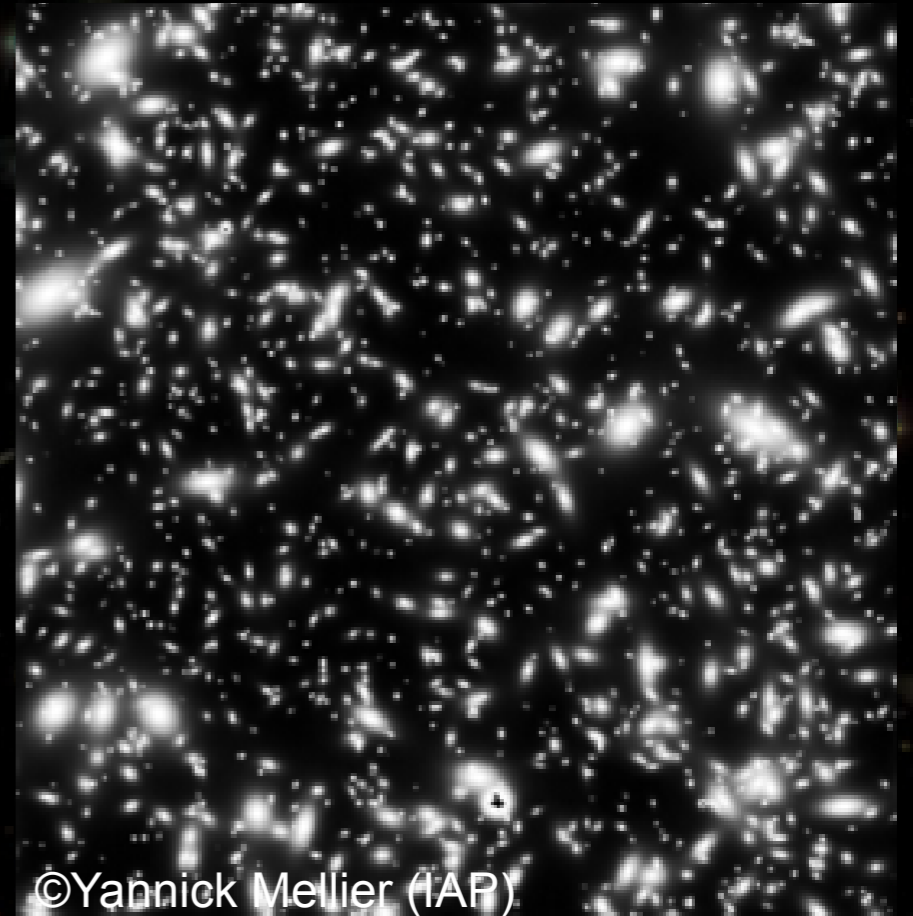
→ 100 à 500 fois la masse stellaire



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

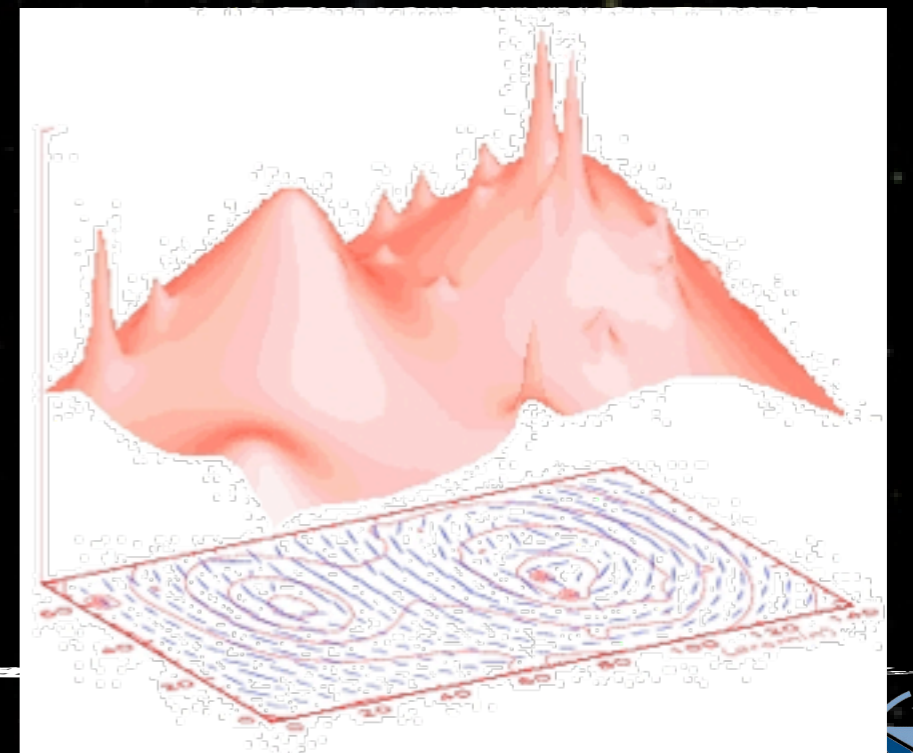
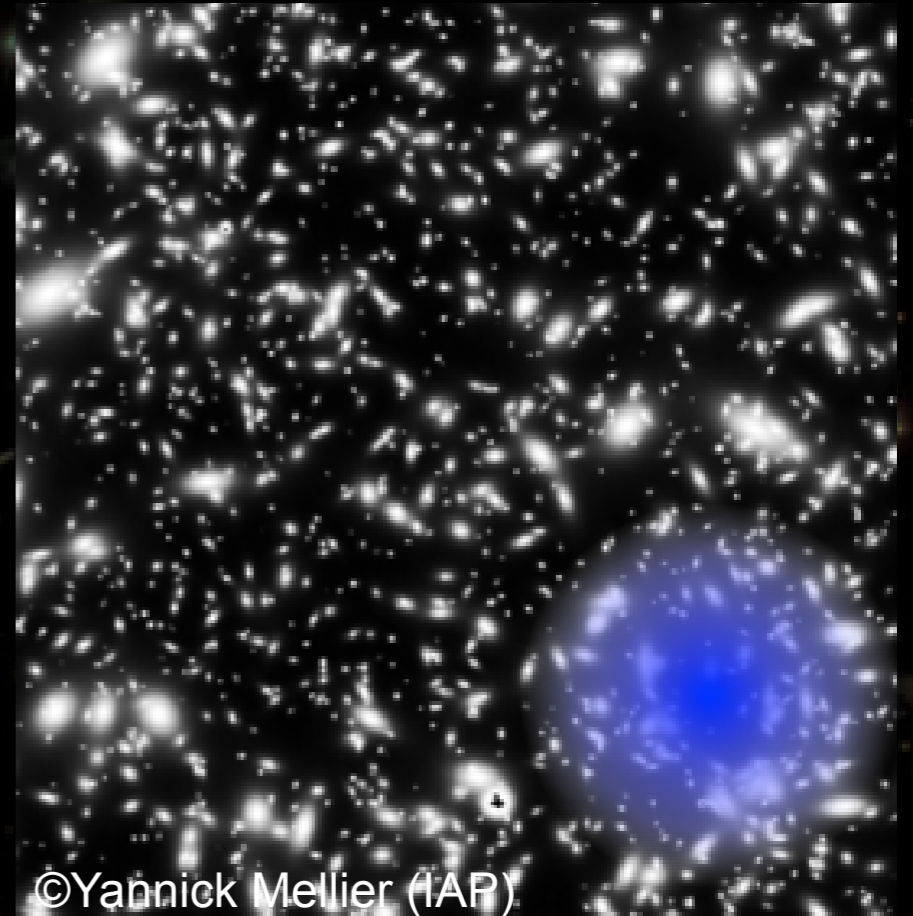


ctuelle



Lentillage gravitationnel

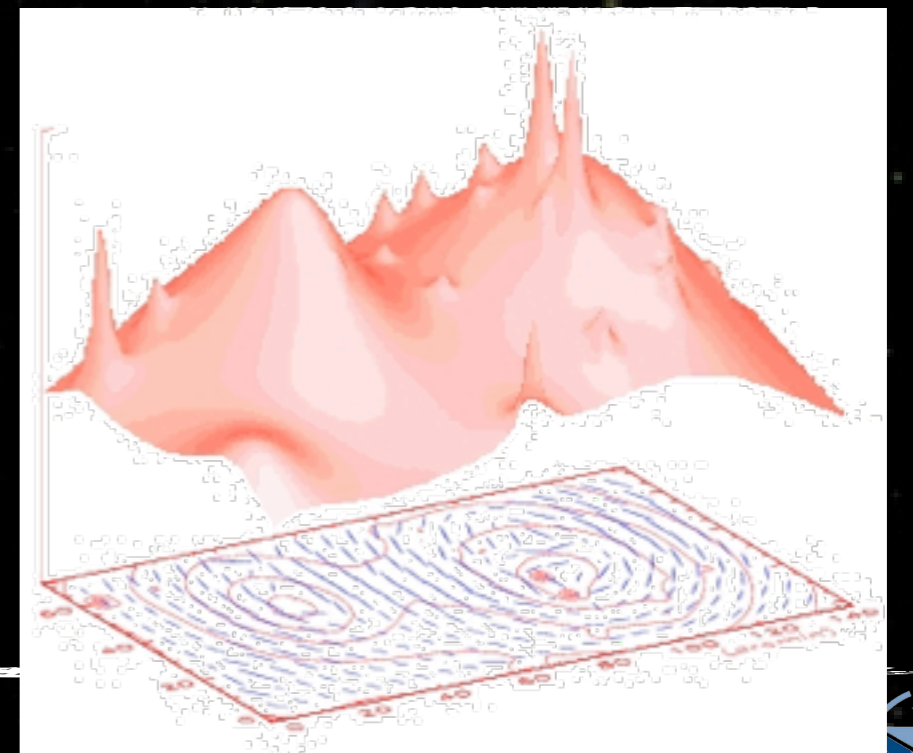
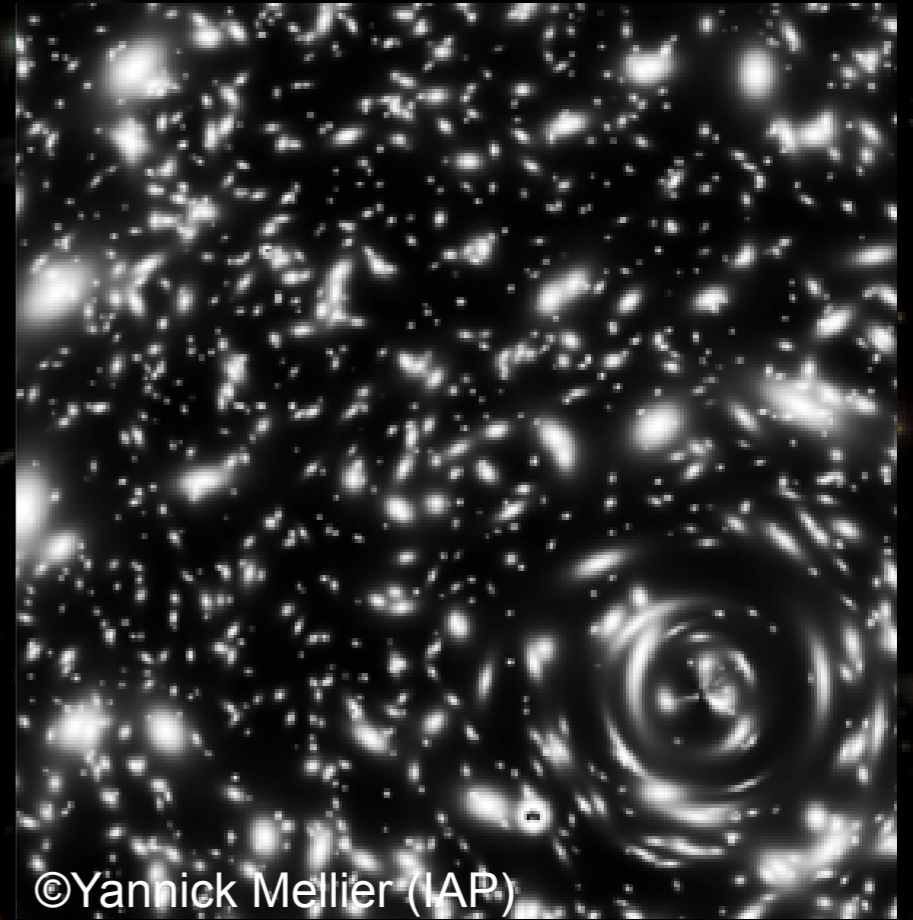
- La masse courbe l'espace-temps
 - ★ Le trajet des photons est défléchi par la masse
- Un amas très massif va déformer les images des objets d'arrière-plan
 - ★ Mirages gravitationnels (arcs, images multiples)
 - ★ Lentillage faible : déformation légère des galaxies d'arrière plan
 - Ellipticité et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



ctuelle

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



J.-Ch. Hamilton - 2011

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 ($\sim 85\%$) pour chauffer suffisamment le gaz !

Amas Abell 2029

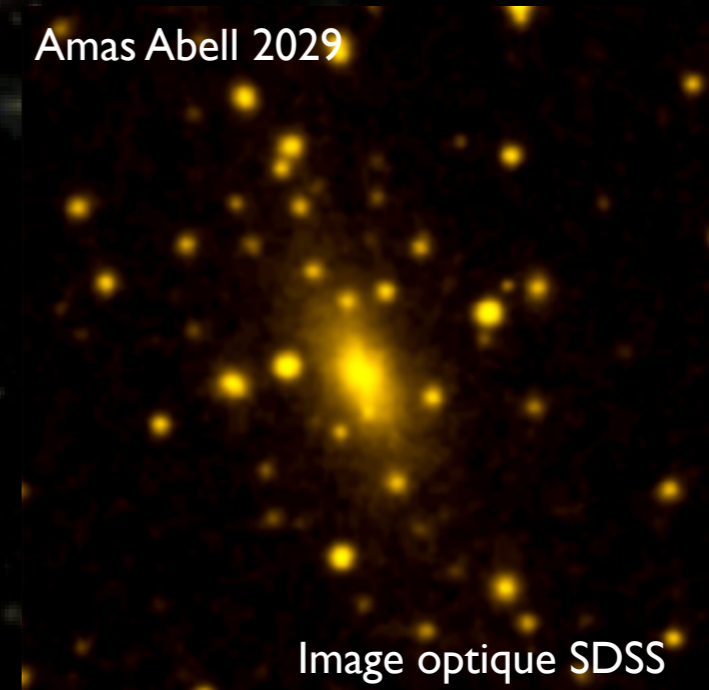
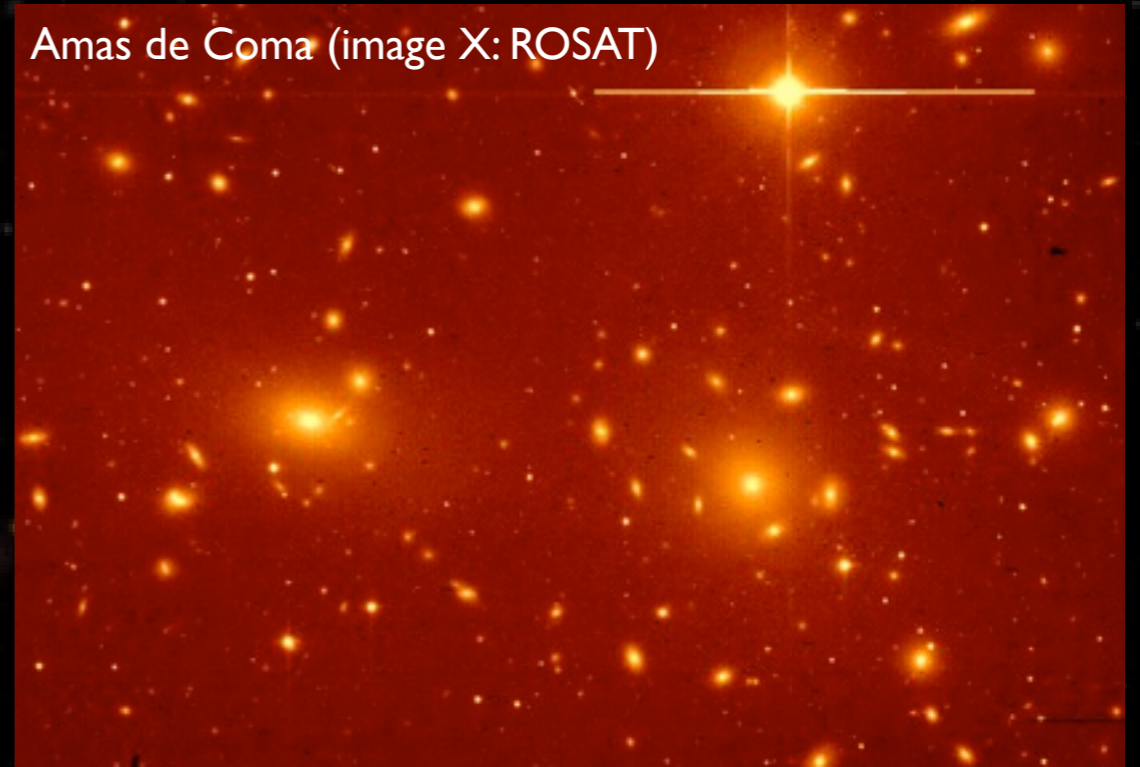


Image optique SDSS

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

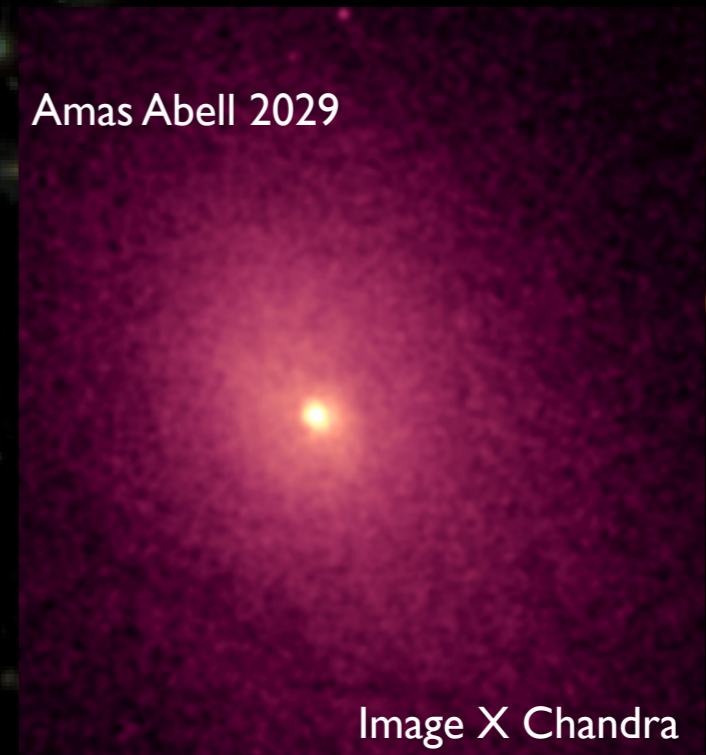
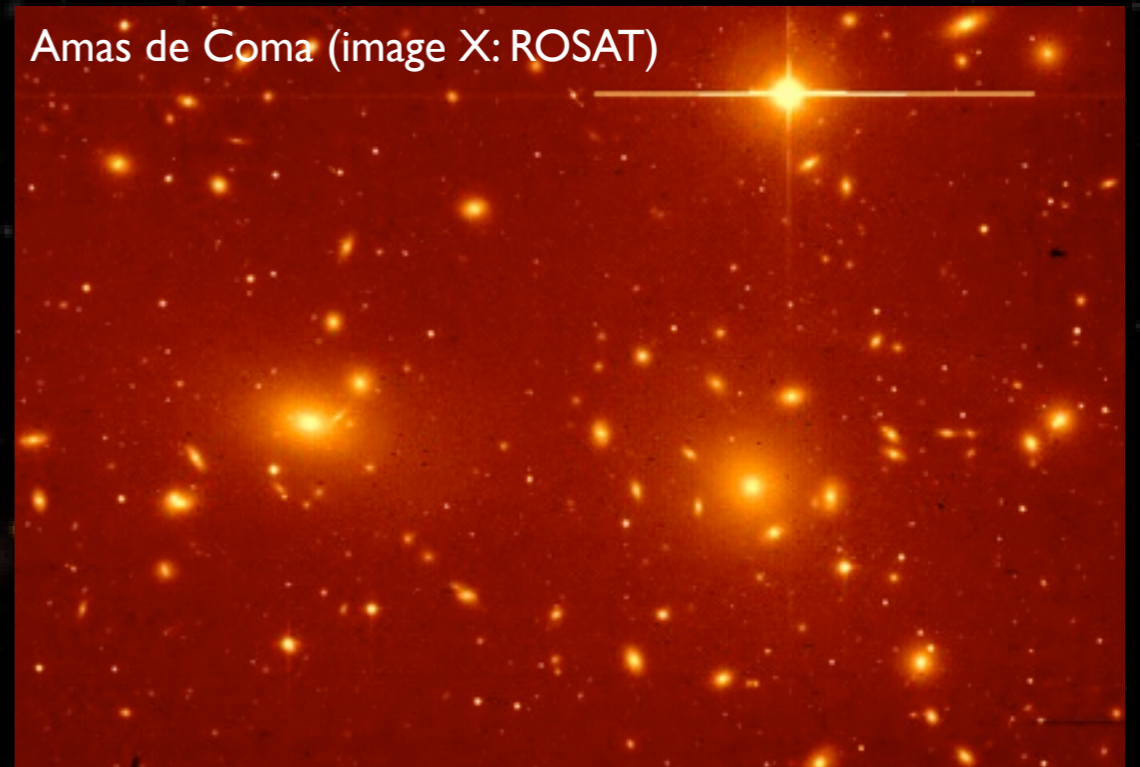


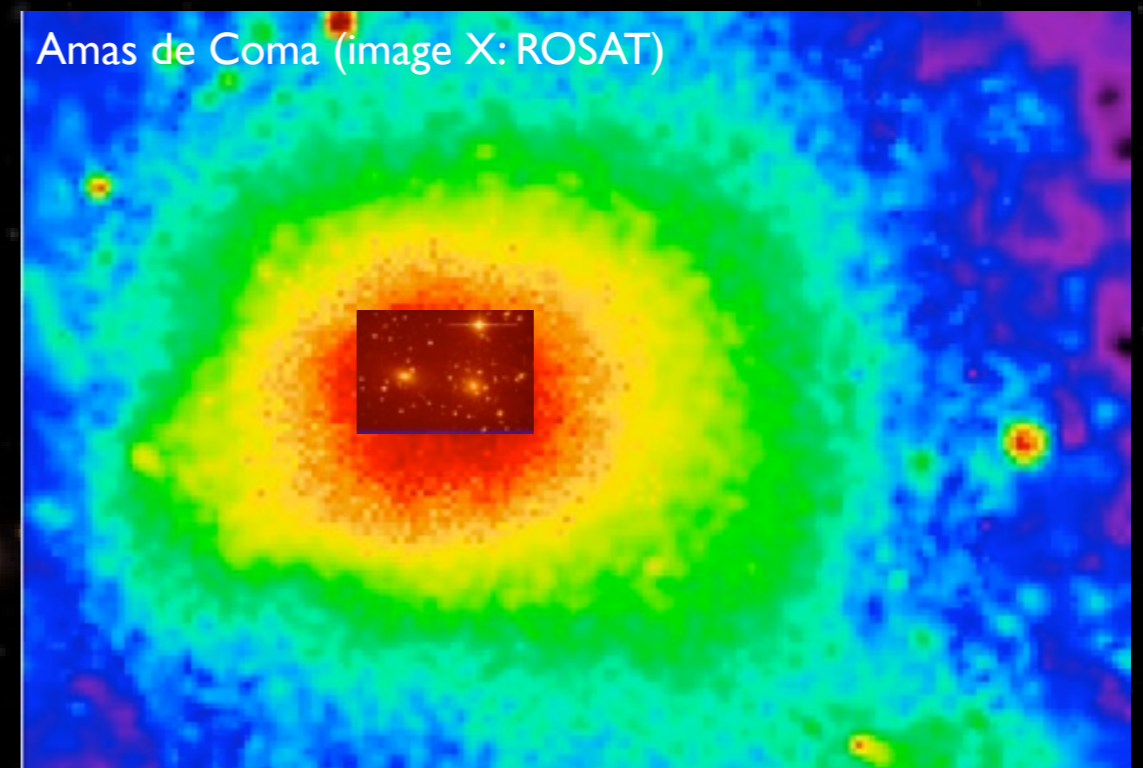
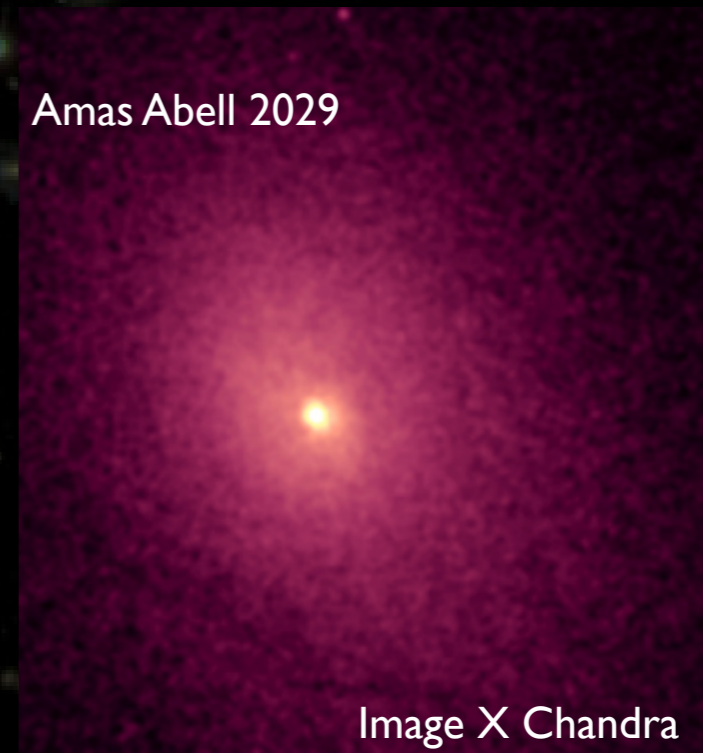
Image X Chandra

Amas de Coma (image X: ROSAT)



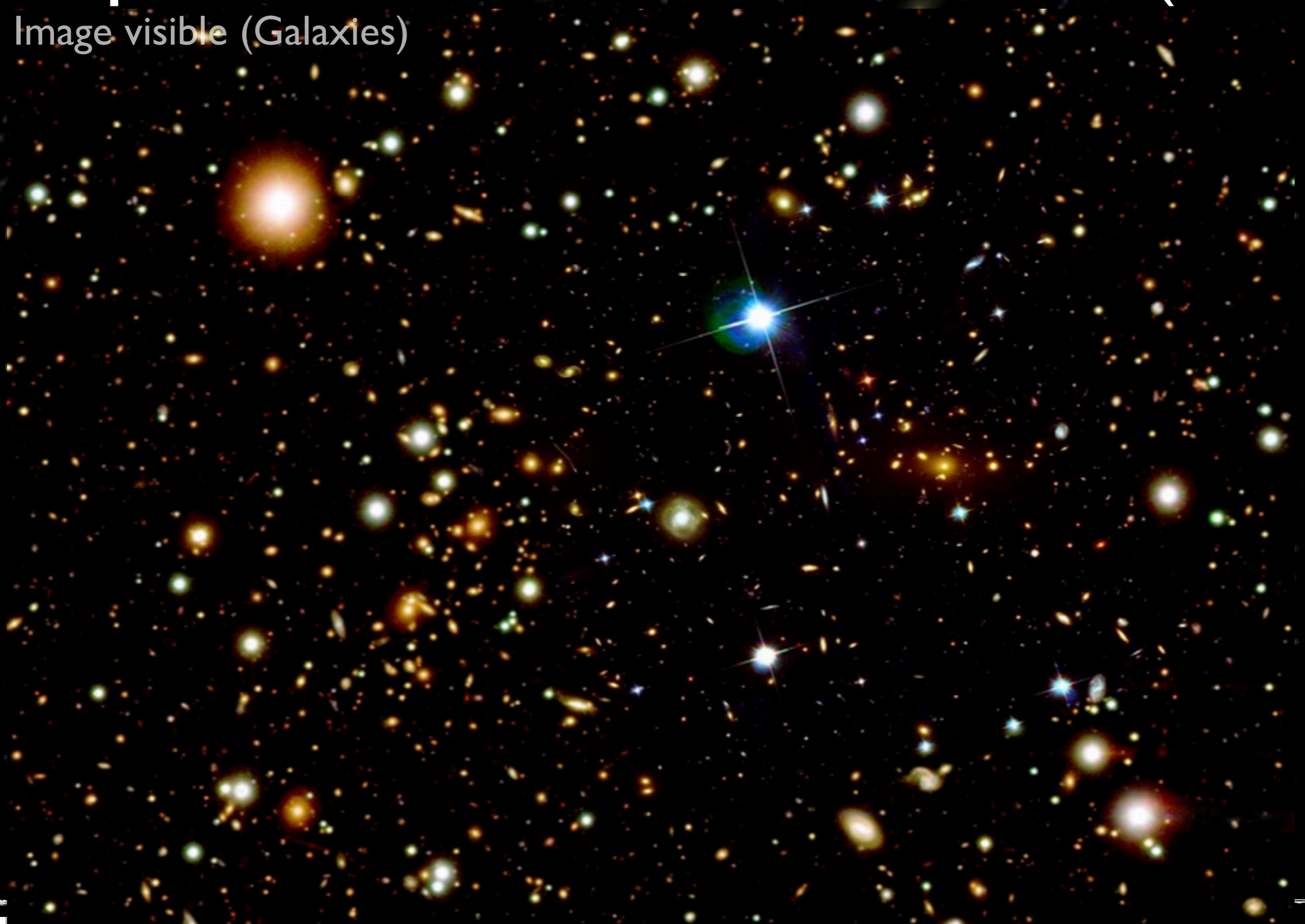
Emission X des amas

- 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

Les fondements de la cosmologie actuelle

J.-C. HUBERON - 2011



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

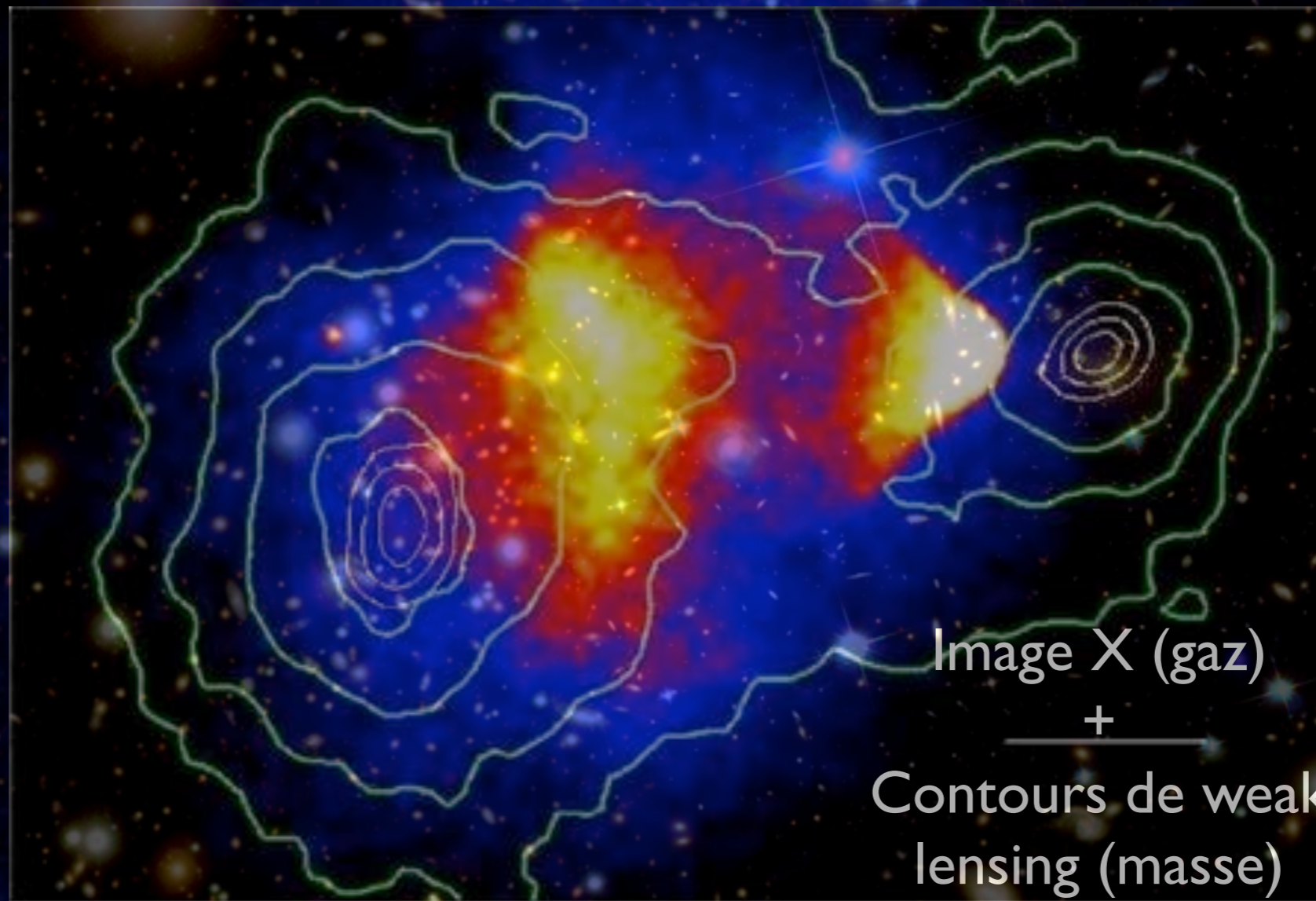


Image X (gaz) - Chandra

Les fondements de la cosmologie actuelle

J.-C. HUBERON - 2011

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

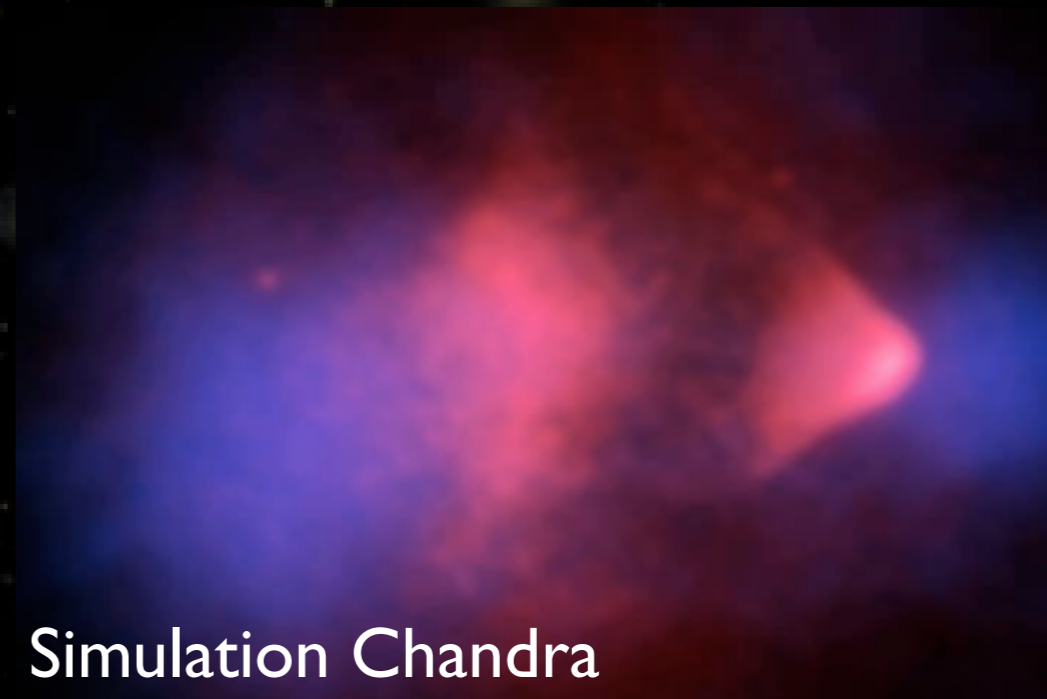
Visible : Galaxies

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



Simulation Chandra



Matière noire Galactique



Matière noire Galactique

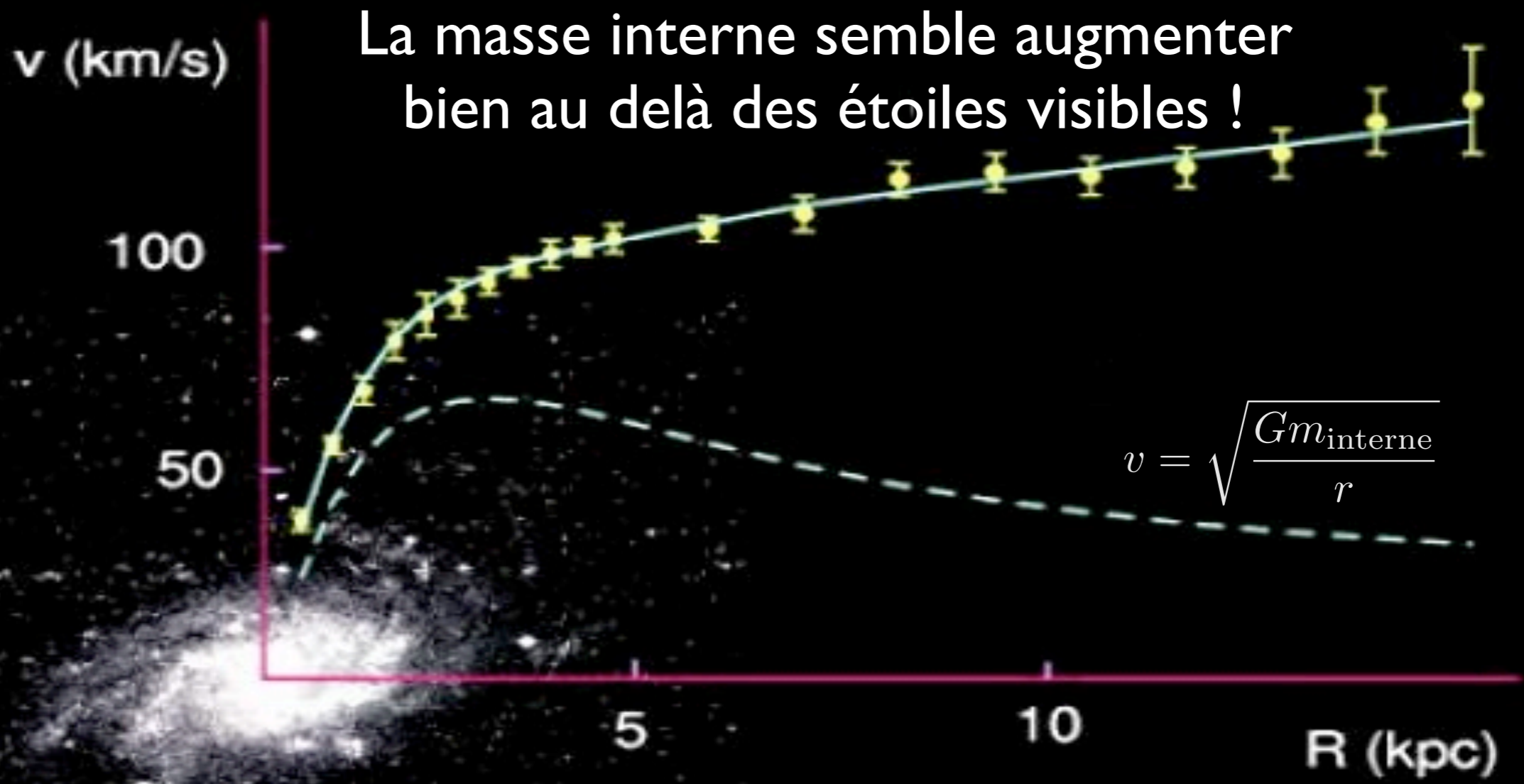
Vitesse de rotation typique
des étoiles : 200 km/s

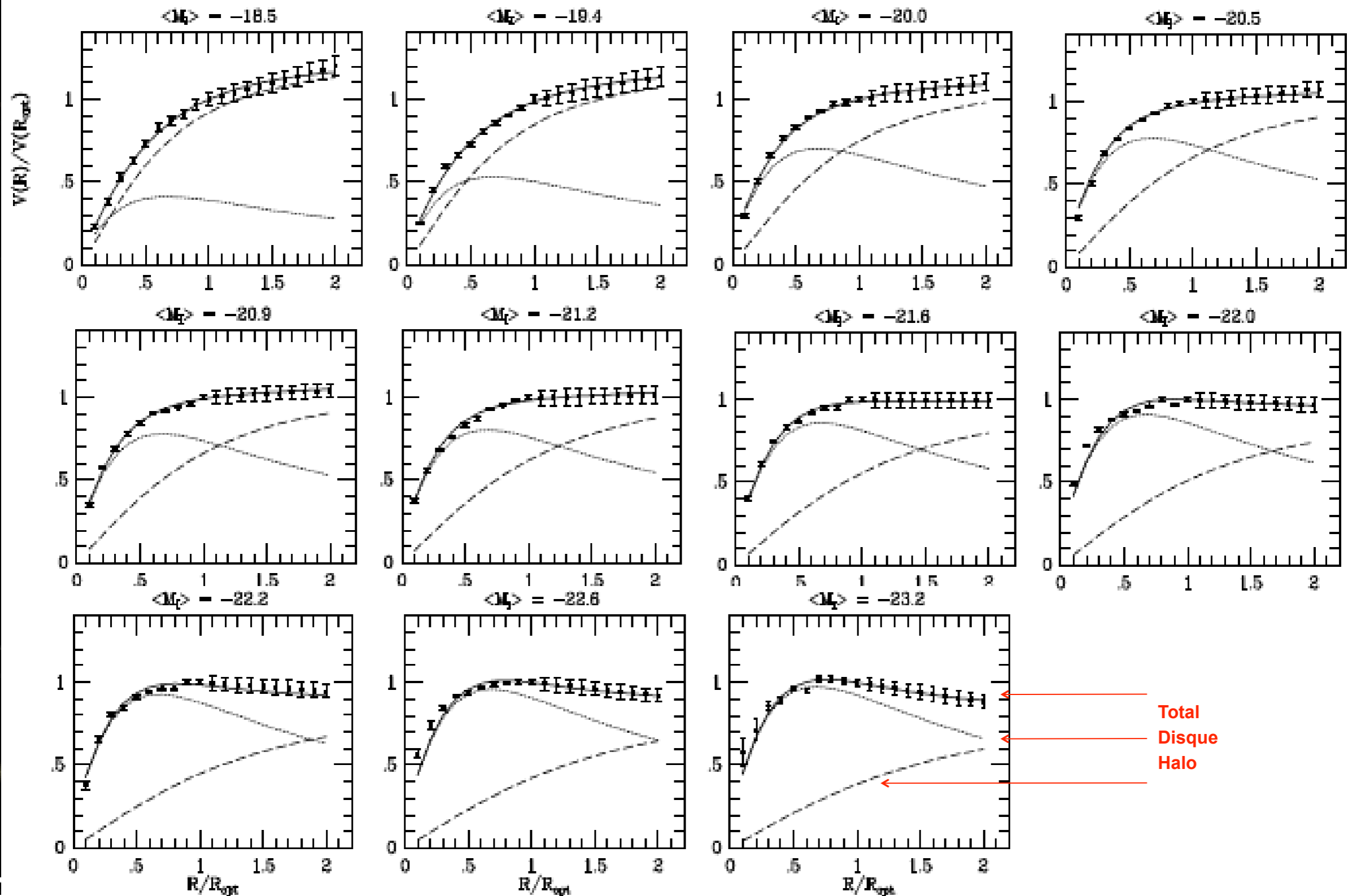


Le profil de vitesse permet
de reconstruire la masse !

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

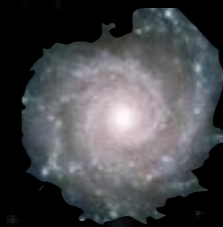
M33





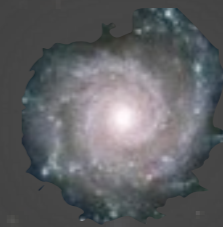
Halo de matière noire

- 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



Énergie sombre:

- Questions importantes :

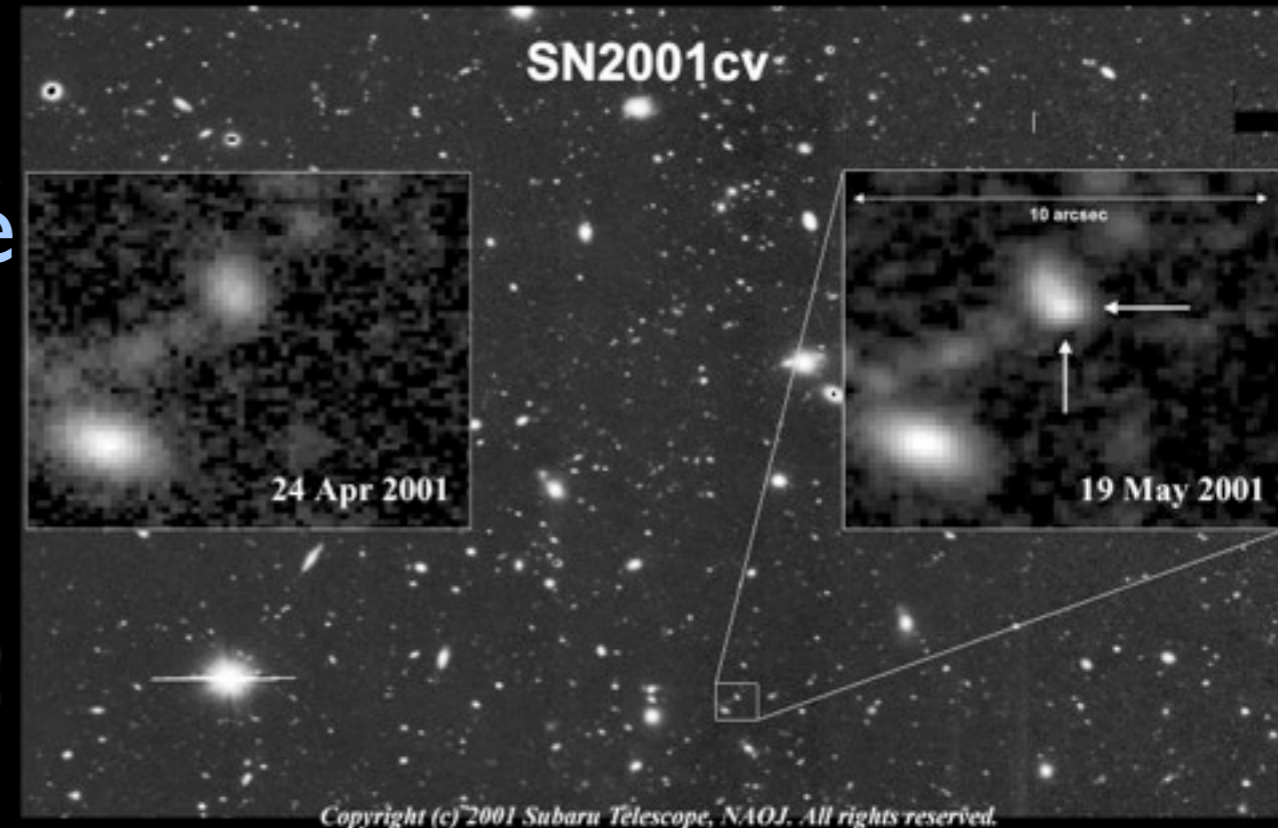
- ★ Valeur de Ω_Λ
- ★ Nature de l'énergie sombre : équation d'état «w»
 - Ingrédient des équations de Friedman : $p = w\rho$

- Indications observationnelles:

- ★ Supernovae de type Ia
 - Mesure de distance de luminosité
- ★ Soustraction cosmique
 - Beaucoup d'observations différentes + $\Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$

Les Supernovae de type Ia

- «Stella Nova» (Kepler) aussi brillante qu'une galaxie toute entière
 - ➔ Visible de très loin !
 - ➔ rare ~ qqes / galaxie / siècle

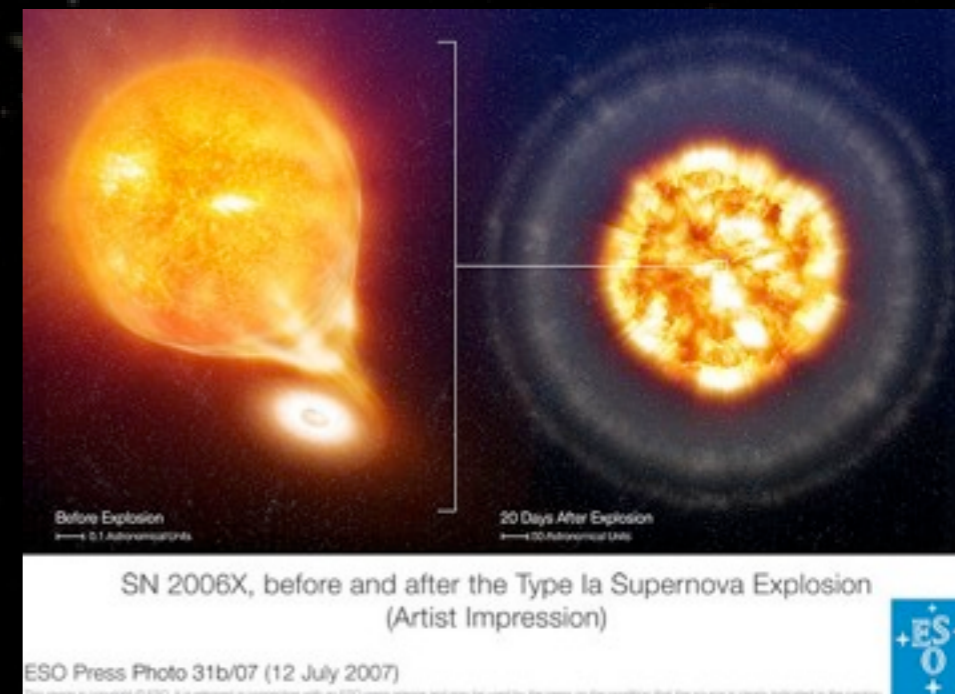
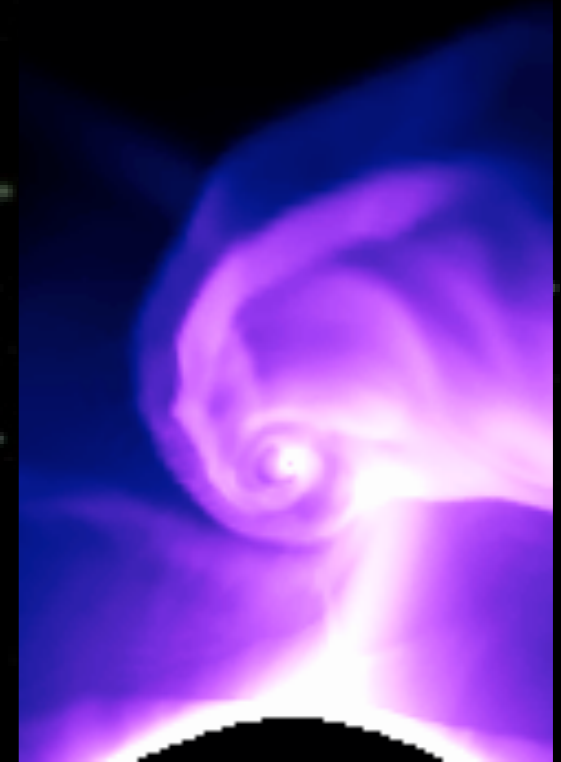


- Explosion stellaire



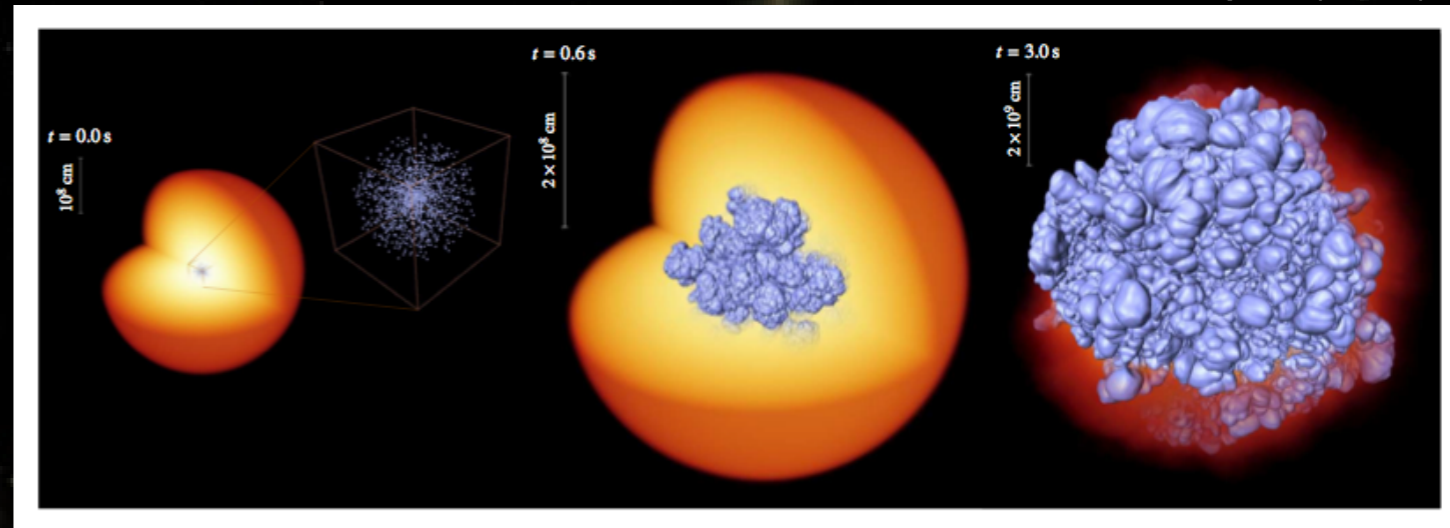
Modèles de supernovae

- **SNII, SNIb/c : «Core Collapse»**
 - ★ effondrement sur elle même d'une étoile massive (jeune)
- **SNIa : Explosion thermonucléaire d'une naine blanche (système binaire)**
 - ★ La naine blanche a consommé tout son H
 - Elle ne tient que par la pression quantique des électrons
 - Stable uniquement si $M < 1.44 M_{\odot}$
 - ★ Elle phagocyte son compagnon
 - sa masse augmente
 - ★ Quand $M/1.44 M_{\odot}$: explosion thermonucléaire
 - La matière est incinérée et forme des noyaux lourds



SNIa

Röpke (2006)



- Physique de l'explosion mal comprise

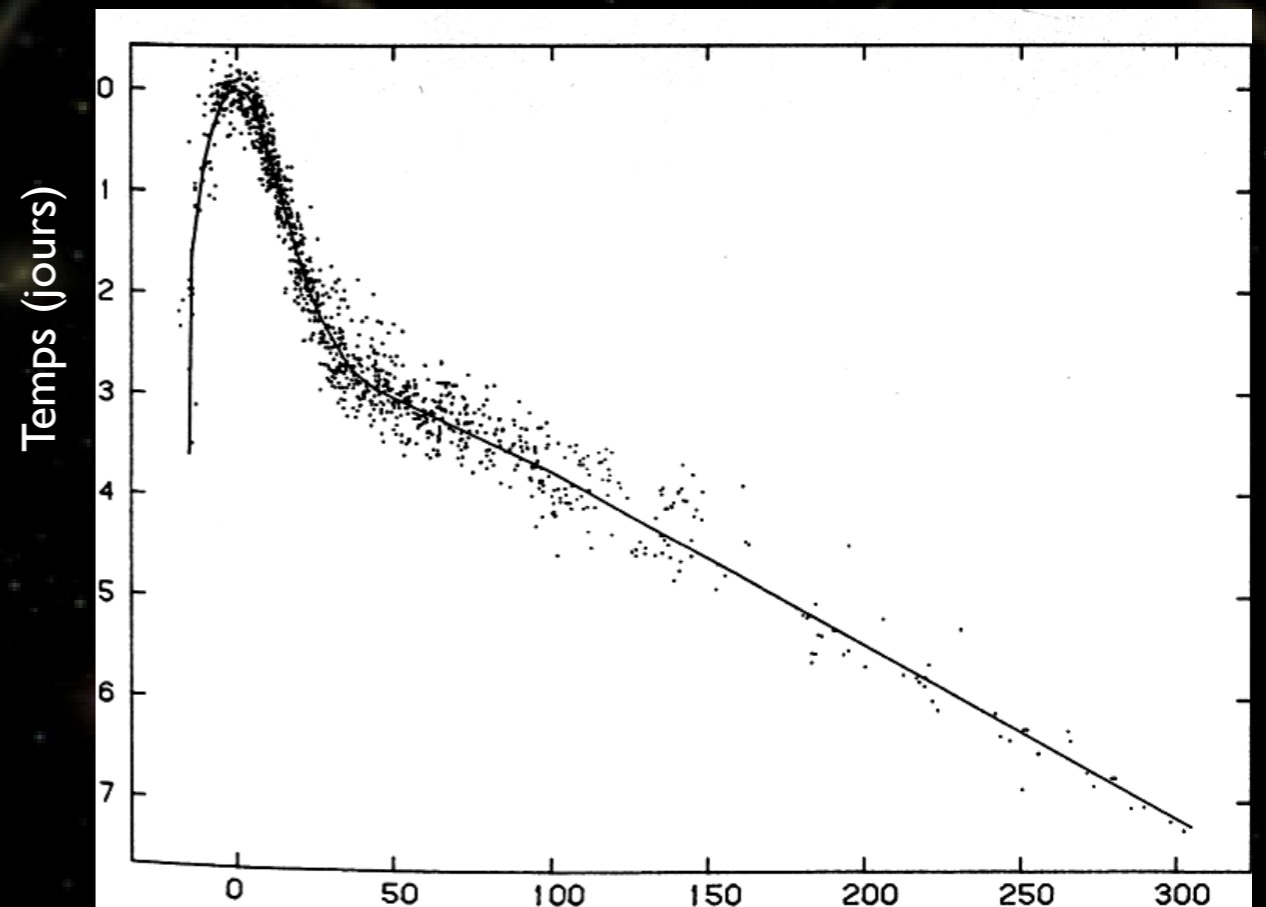
- ★ mode d'ignition ?
- ★ Détonation (supersonique) ?
- ★ Déflagration (subsonique) ?

- L'explosion produit une large quantité de ^{56}Ni

- ★ Désintégration : $\sim 15j$
- ★ Suivi de Cobalt : \sim plusieurs mois

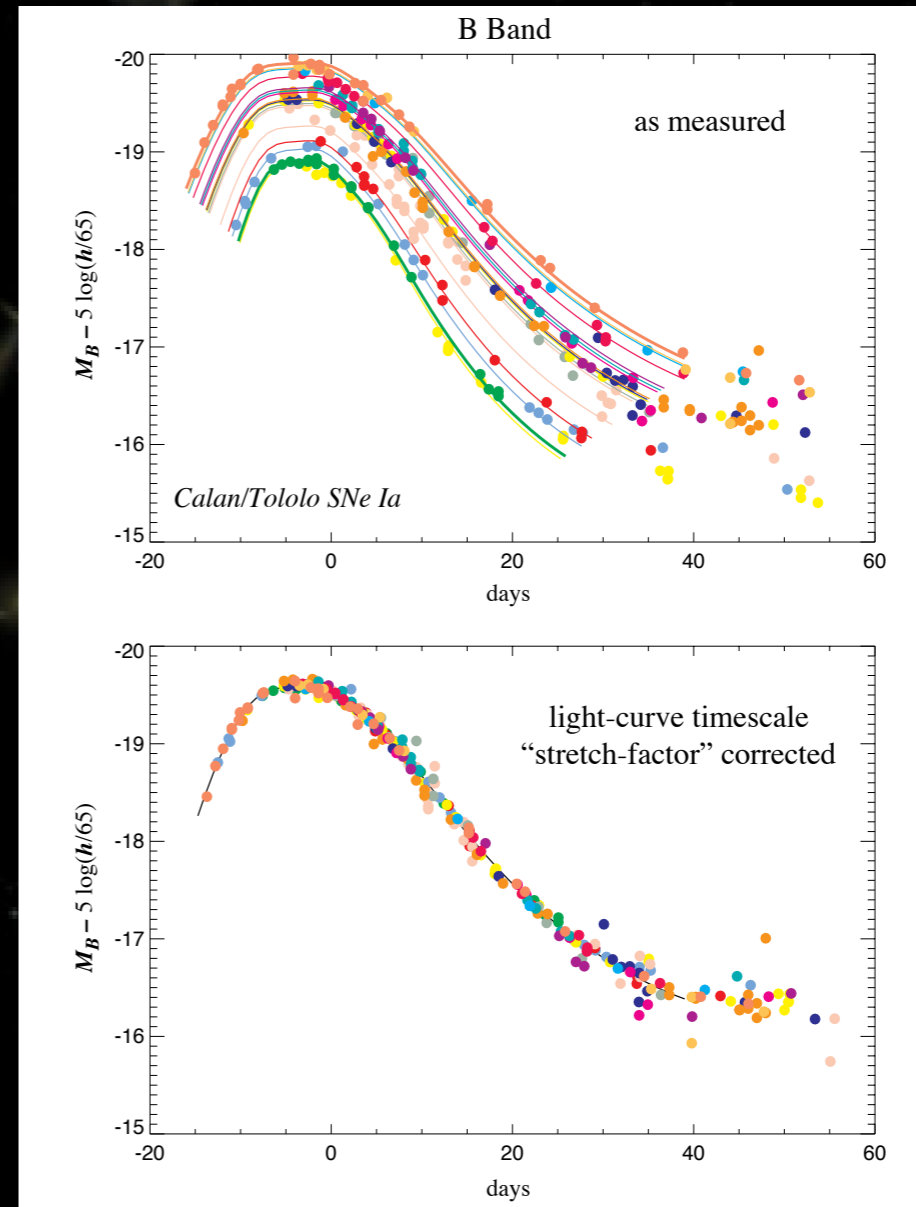
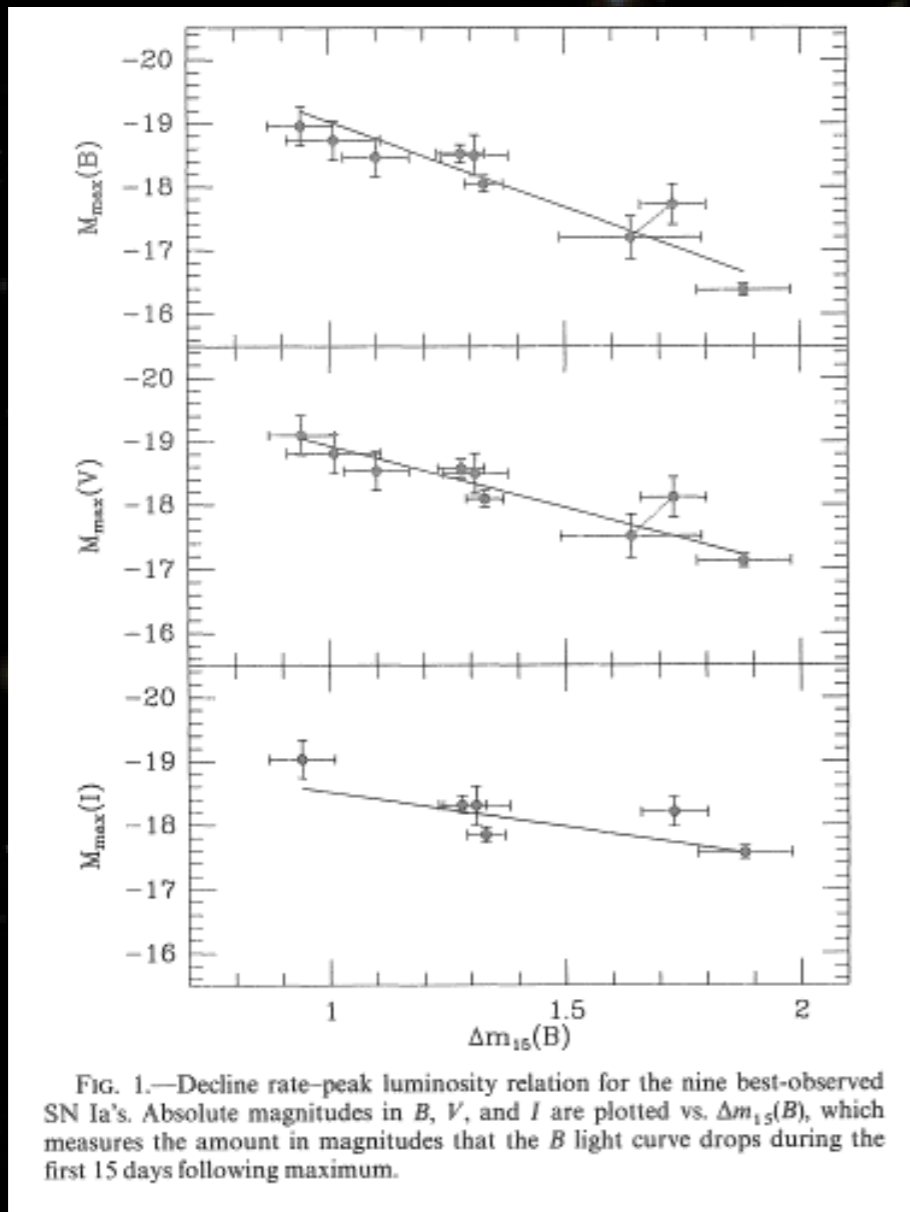
- La masse est toujours la même

- ★ On attend une grande homogénéité



SN Ia : Chandelles standard

- Très lumineuses (plus que leur galaxie): visibles de loin
- Luminosité au max. standardisable : Mesure de $D_I(z)$



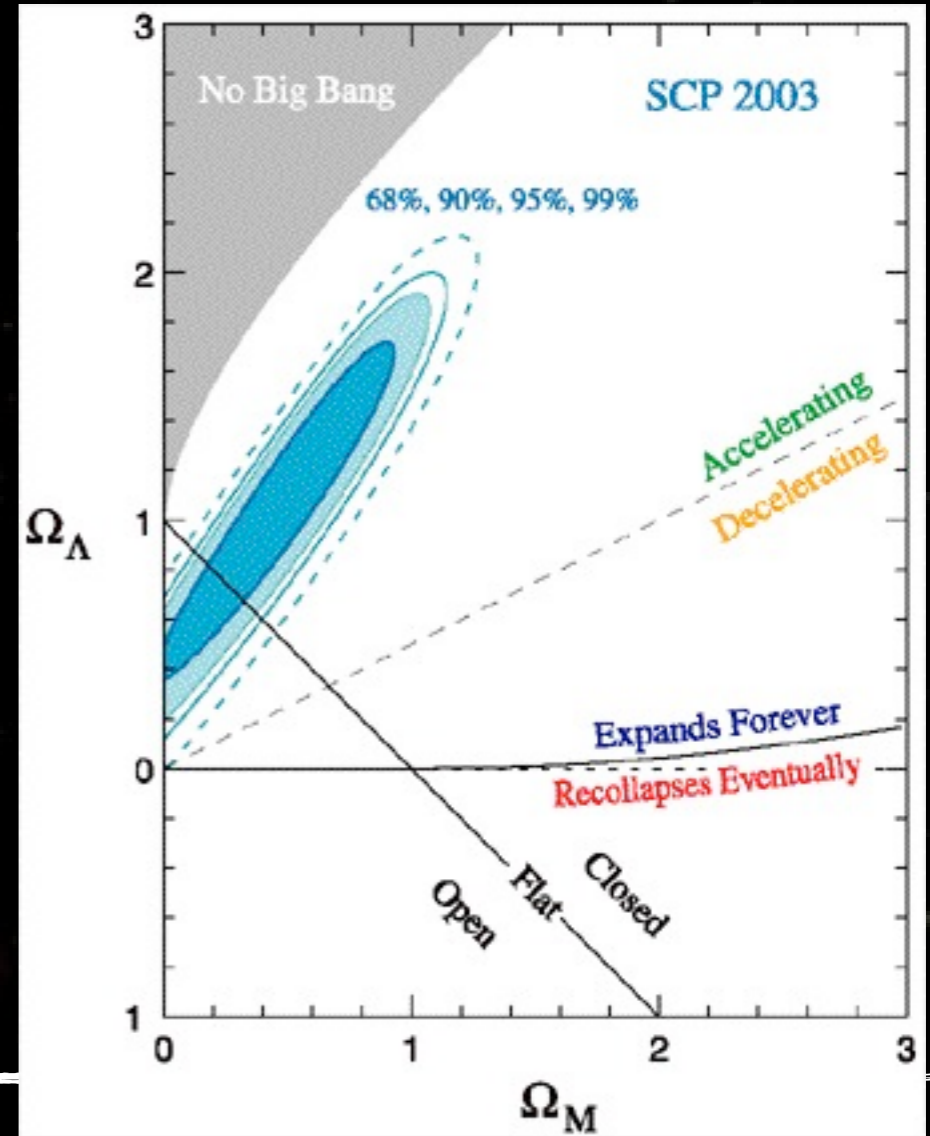
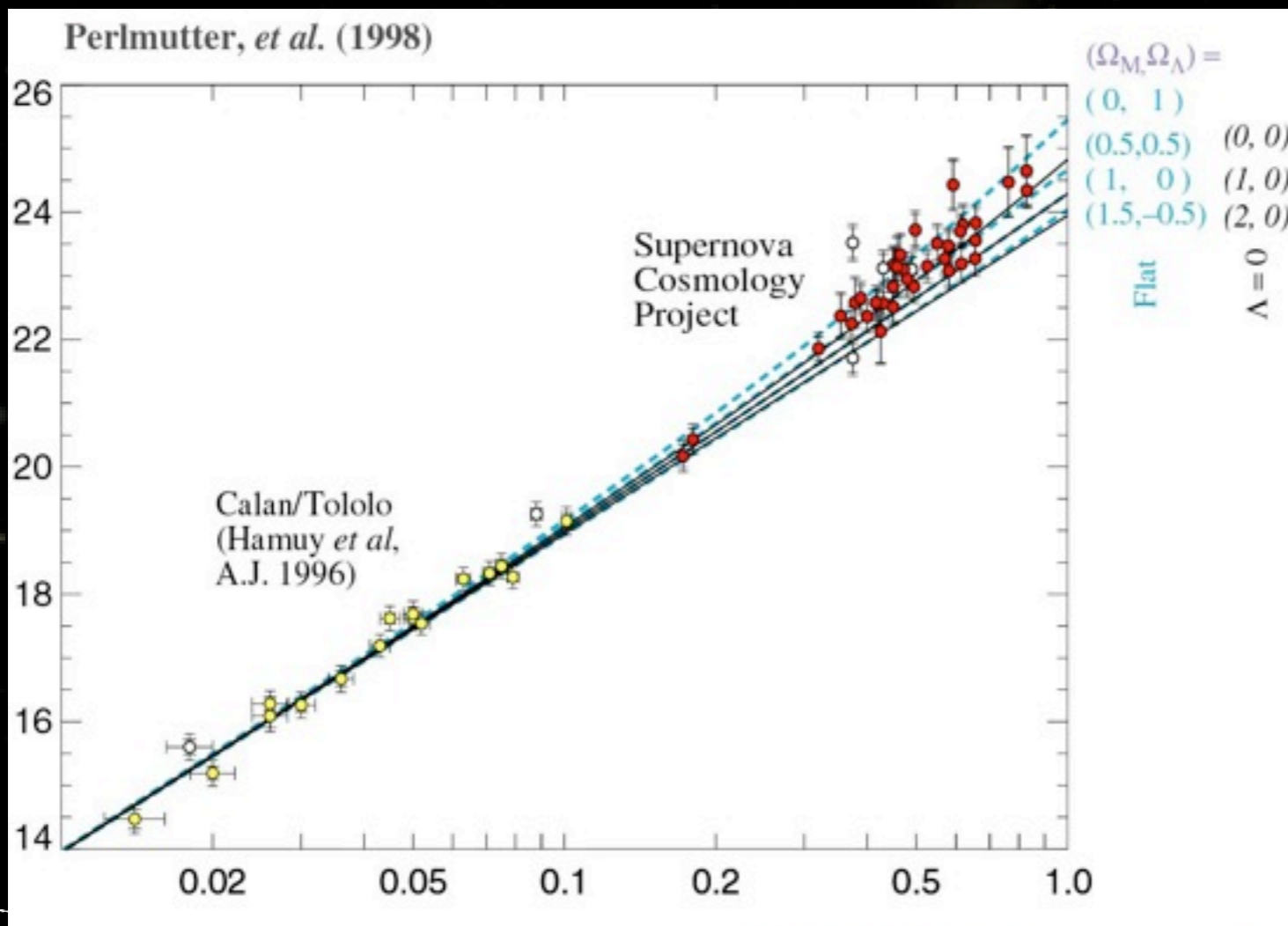
Kim (1996)

«Découverte» de Λ : 1998

- Deux équipes :
 - ★ SCP : Perlmutter et al.
 - ★ High-z : Riess et al.

L'Univers est en expansion accélérée !

Luminosité



«Découverte» de Λ : 1998

- Deux équipes :
 - ★ SCP : Perlmutter et al.
 - ★ High-z : Riess et al.

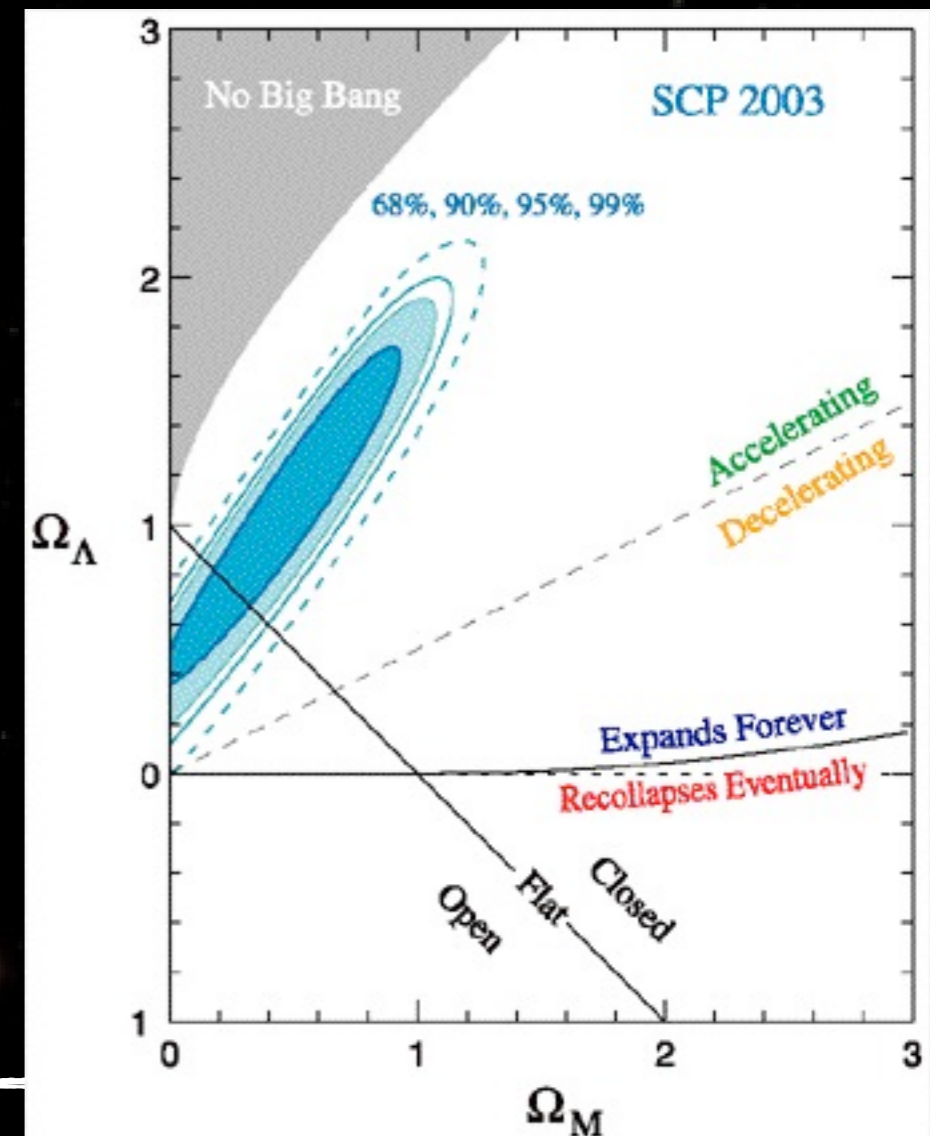
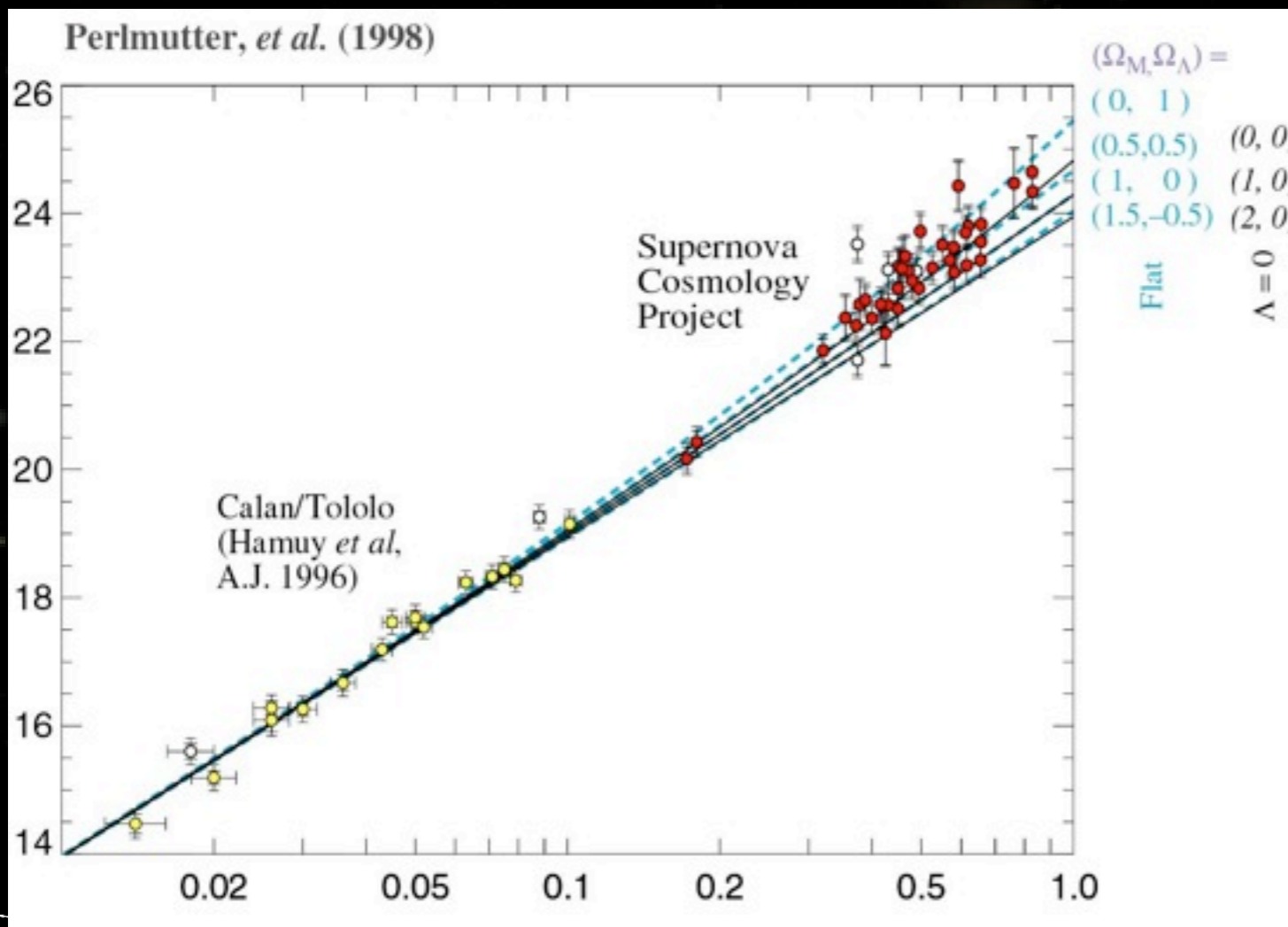


S. Perlmutter B. Schmidt A. Riess



Prix Nobel 2011

L'Univers est en expansion accélérée !



J.-Ch. Hamilton - 2011

Luminosité



Les fondements de la cosmologie actuelle



«Découverte» de Λ : 1998

- Deux équipes :
 - ★ SCP : Perlmutter et al.
 - ★ High-z : Riess et al.



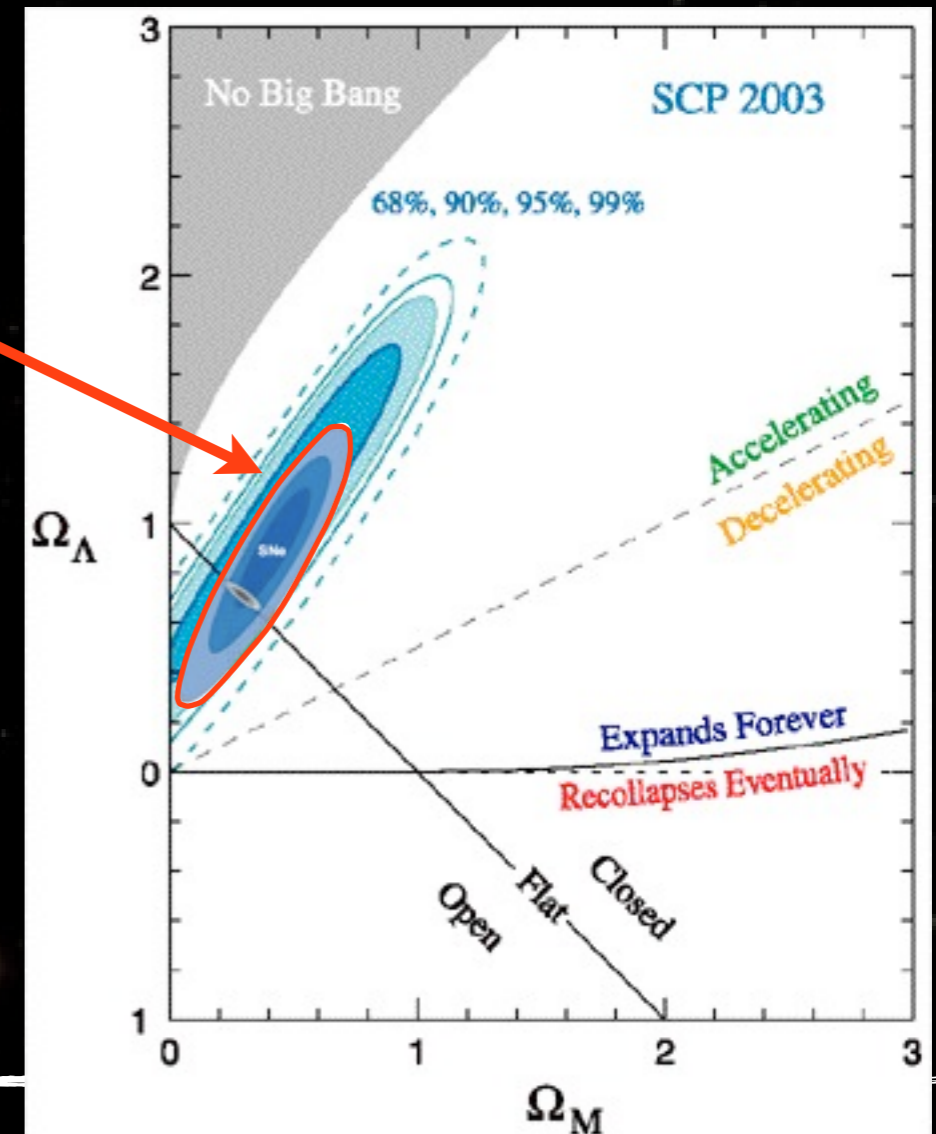
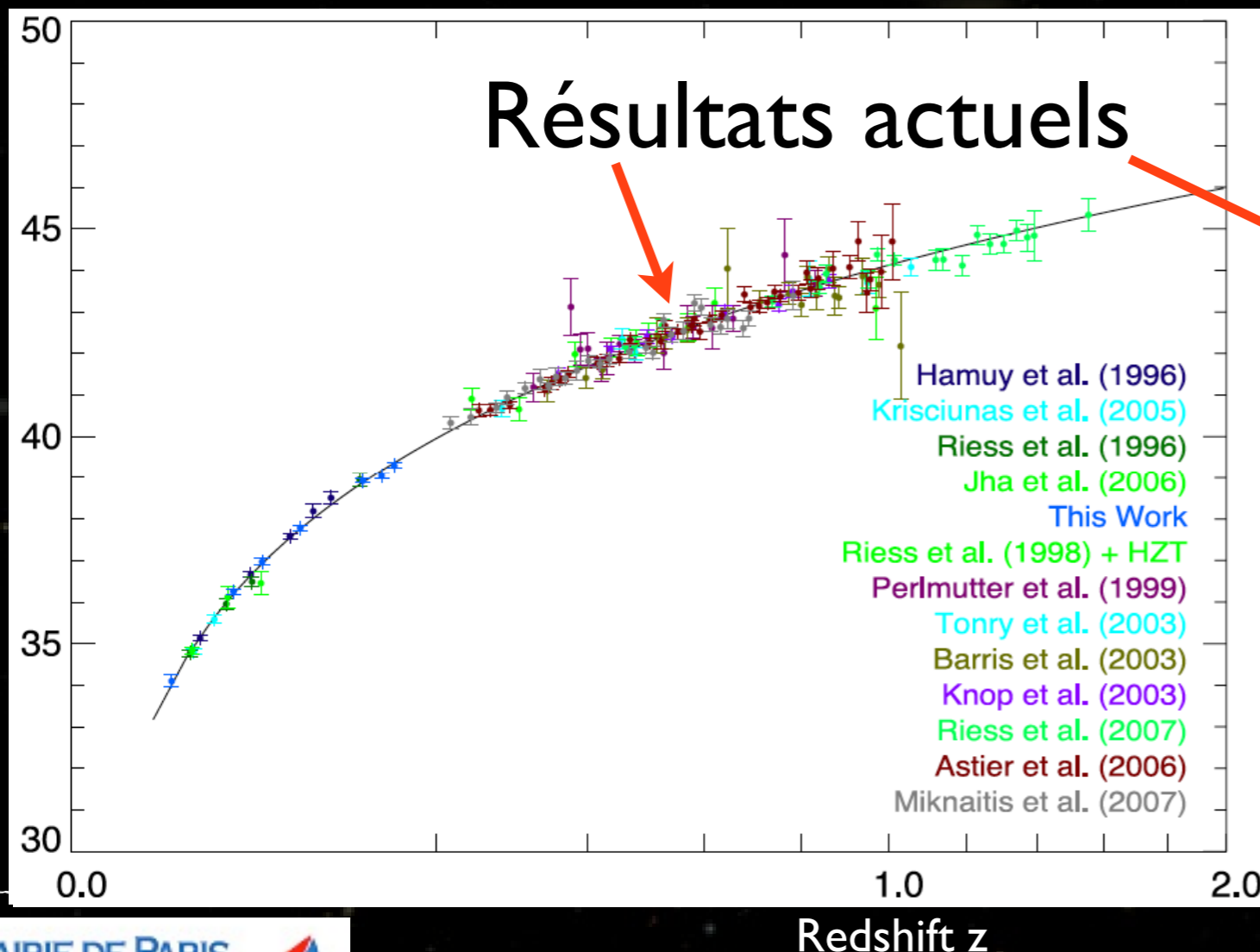
S. Perlmutter B. Schmidt A. Riess



Prix Nobel 2011

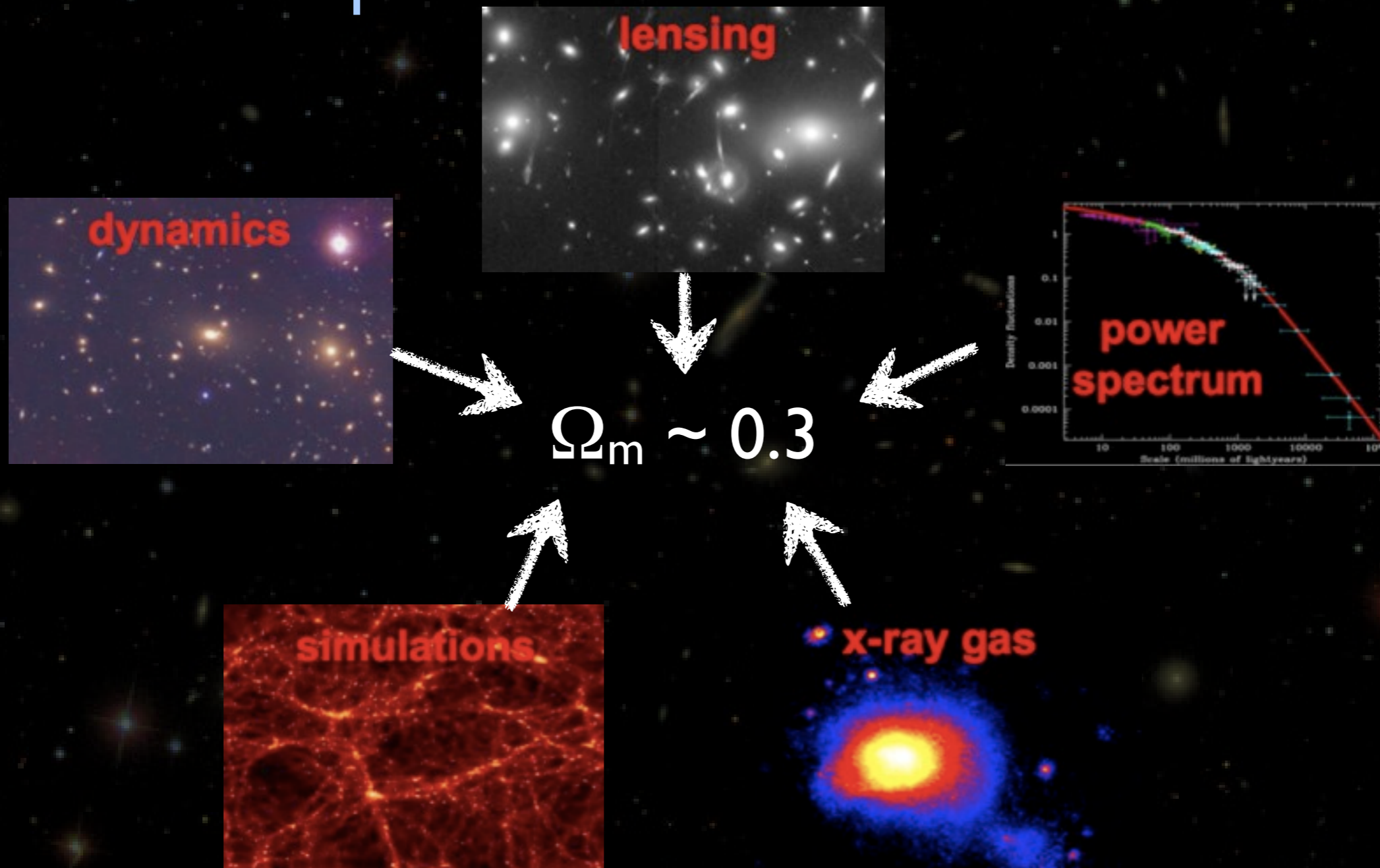
L'Univers est en expansion accélérée !

Résultats actuels



Soustraction Cosmique

- Diverses observations montrent que $\Omega_m=0.3$ et que l'Univers est plat



Tiré de R. Kolb

Soustraction Cosmique

Rappel: $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$

Ω_{tot} → $1 - 0.3 = 0.7$ ← $\Omega_\Lambda ?$

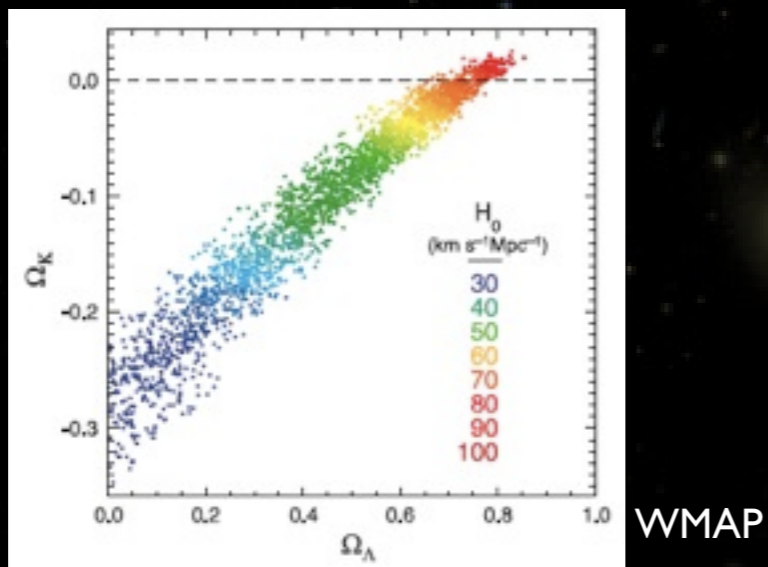
↑
 Ω_m

Preuves expérimentales de Λ

- Trois méthodes indépendantes

- Convergence remarquable

★ $\Omega_m=0.3$ $\Omega_\Lambda=0.7$

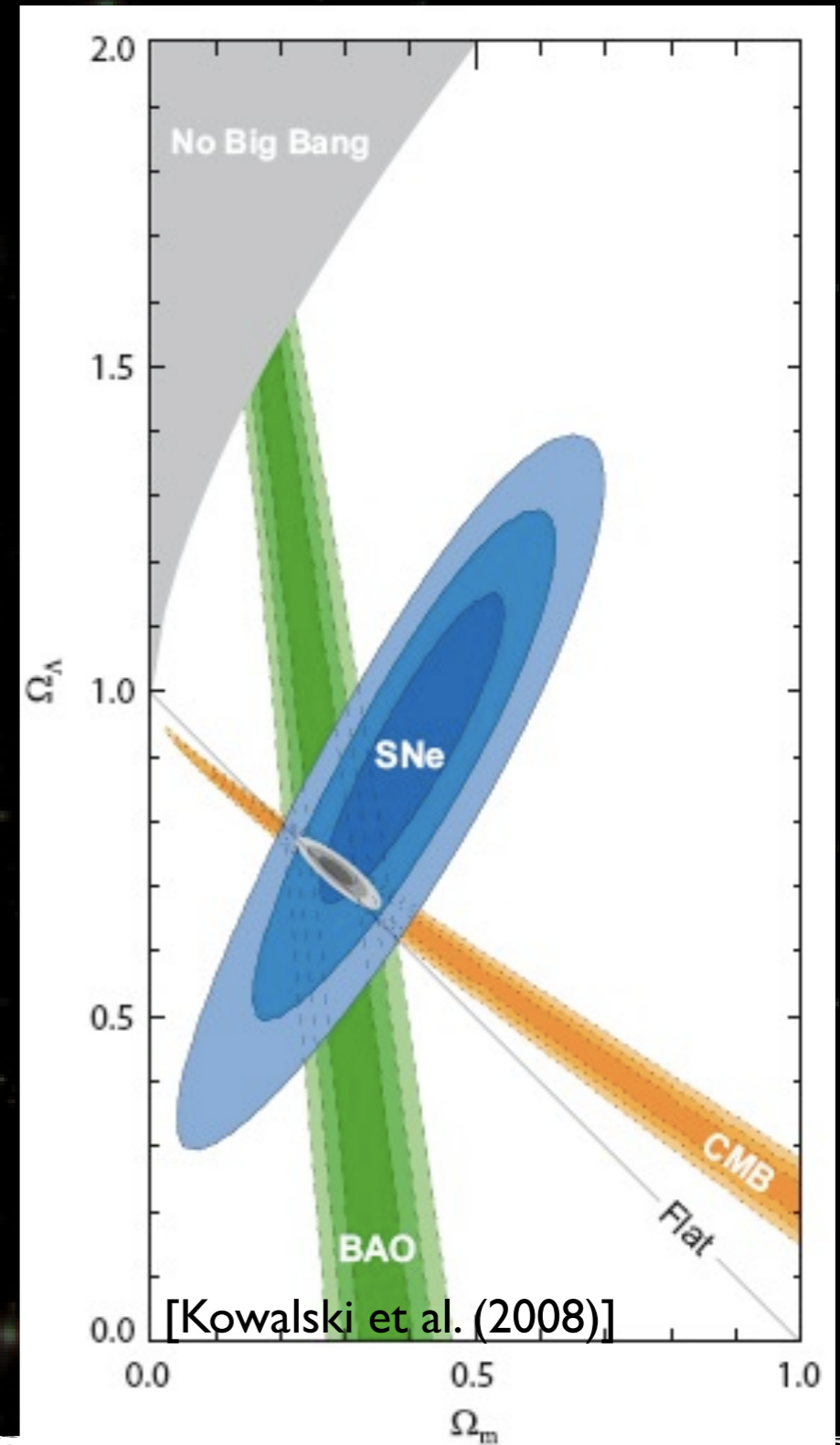


- Λ CDM est incontournable

- ★ Bug théorique ? observationnel ?
- ★ Énergie noire ?
- ★ Gravitation ?

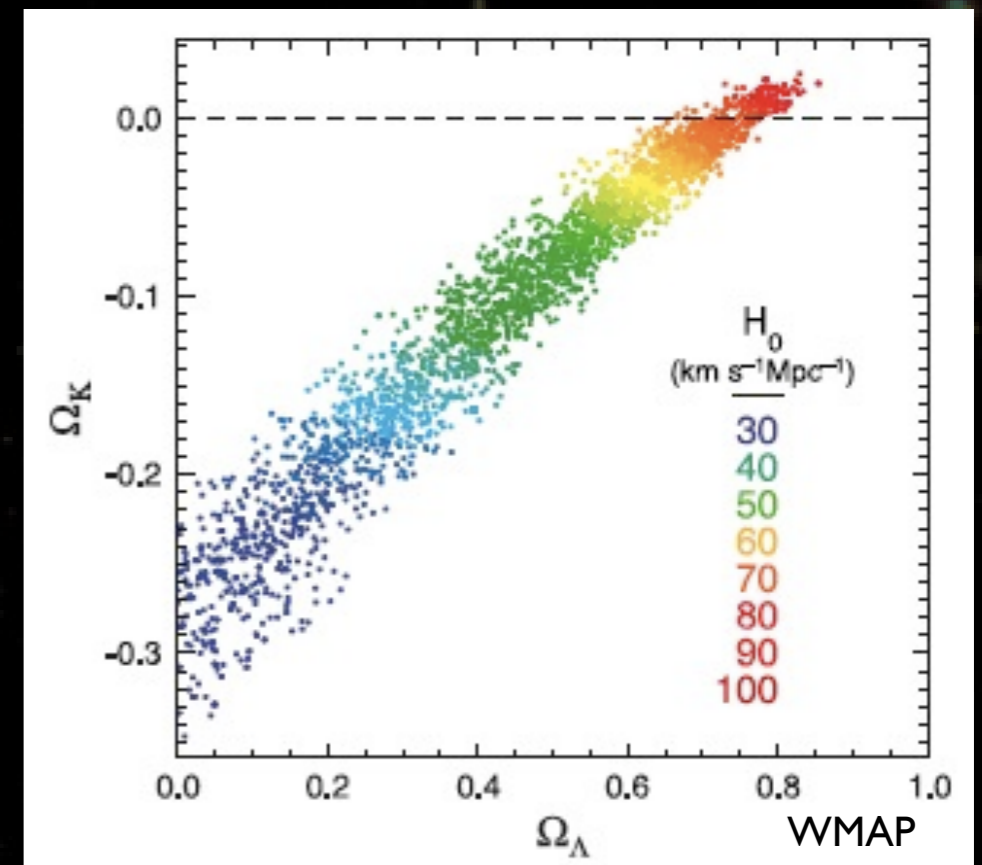
➔ Aller plus loin: équation d'état de Λ en fct de z

$w(z) = w_0 + z w_1$ ou $w(a) = w_0 + (1-a) w_a$



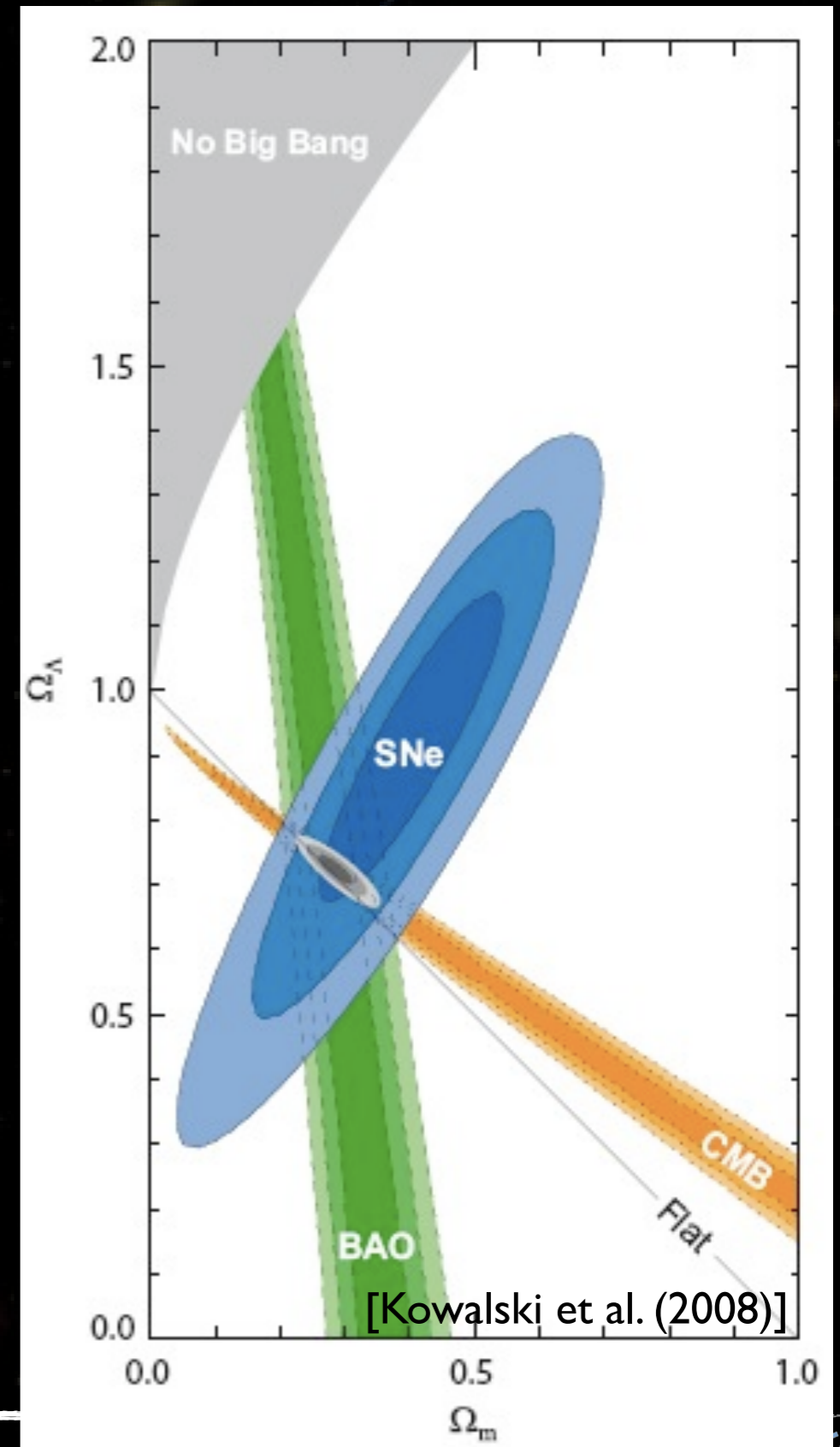
ce que l'on sait

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - ★ **L'Univers est en expansion**
 - Constante de Hubble
 - ★ **L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$**
 - CMB + Constante de Hubble
 - ★ **Il contient de l'énergie sombre $\sim 74\%$**
 - SNIa, CMB+H, mesures de Ω_m
 - quantité connue, nature inconnue
 - ★ **Il contient de la matière noire $\sim 22\%$**
 - Courbes de rotation, formation des structures, CMB
 - quantité connue, nature inconnue



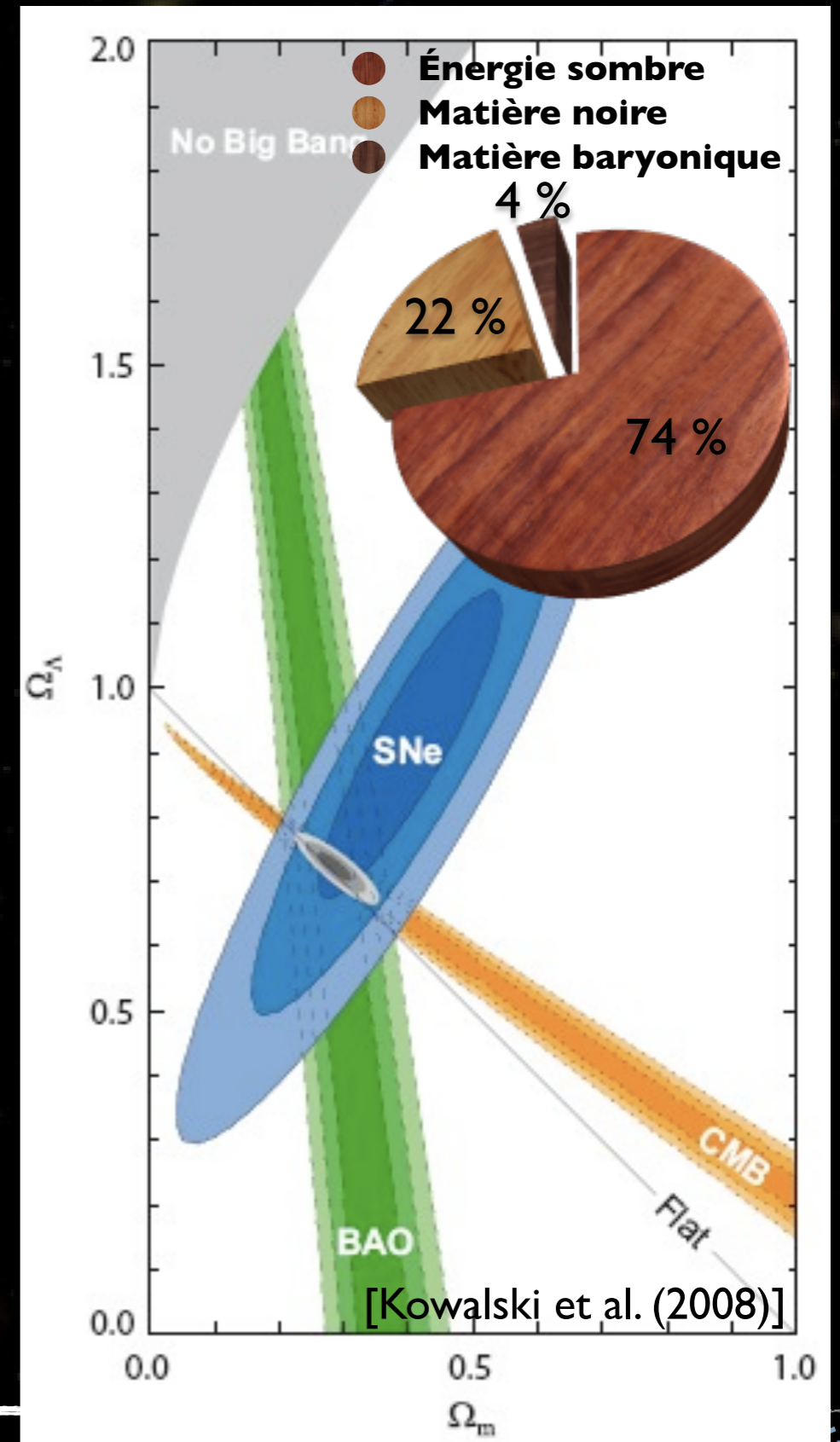
ce que l'on sait

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - ★ L'Univers est en expansion
 - Constante de Hubble
 - ★ L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
 - CMB + Constante de Hubble
 - ★ Il contient de l'énergie sombre $\sim 74\%$
 - SNIa, CMB+H, mesures de Ω_m
 - quantité connue, nature inconnue
 - ★ Il contient de la matière noire $\sim 22\%$
 - Courbes de rotation, formation des structures, CMB
 - quantité connue, nature inconnue



ce que l'on sait

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - ★ L'Univers est en expansion
 - Constante de Hubble
 - ★ L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
 - CMB + Constante de Hubble
 - ★ Il contient de l'énergie sombre ~ 74%
 - SNIa, CMB+H, mesures de Ω_m
 - quantité connue, nature inconnue
 - ★ Il contient de la matière noire ~ 22%
 - Courbes de rotation, formation des structures, CMB
 - quantité connue, nature inconnue

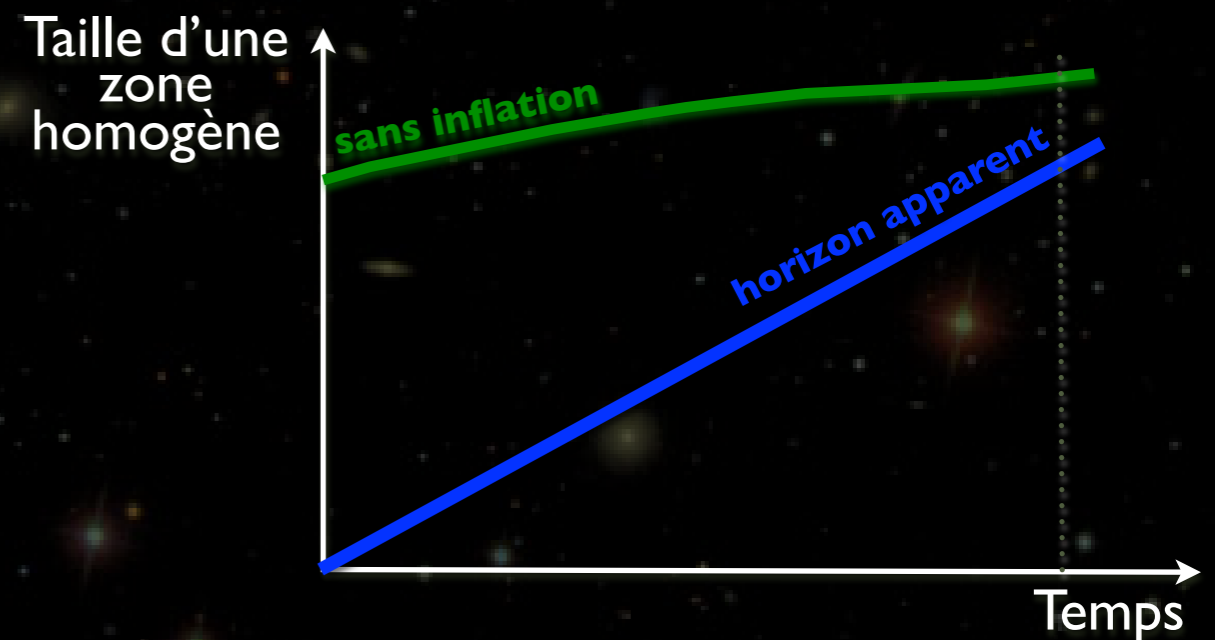
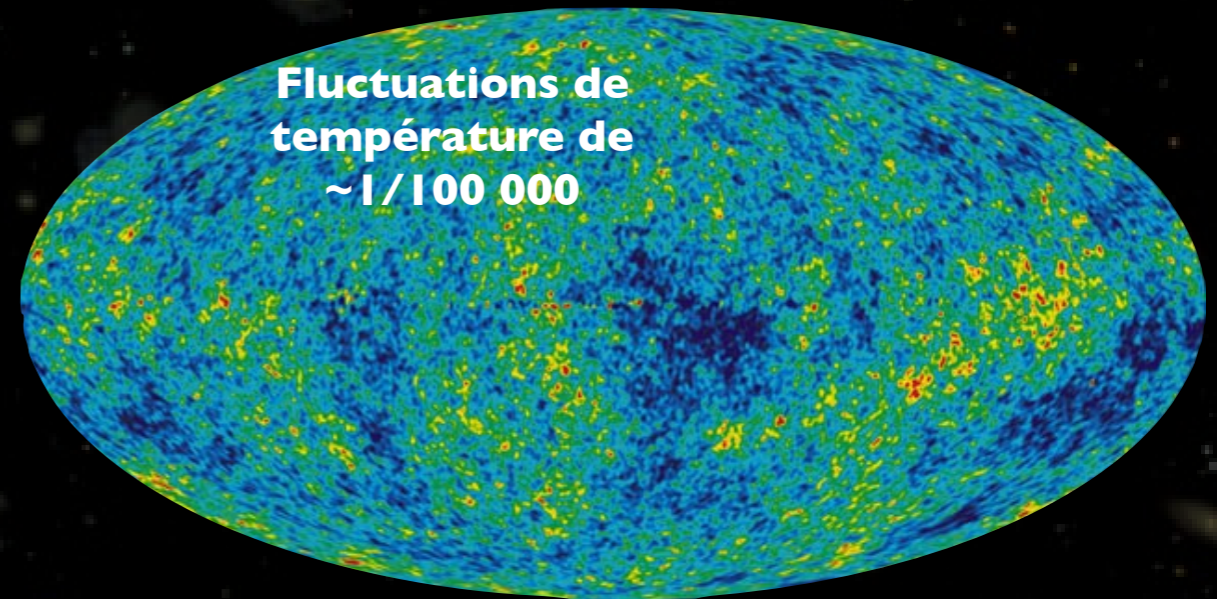


L'Univers primordial: L'inflation

- Expansion accélérée aux premiers instants de l'Univers.
- Résout des paradoxes connus du modèle du Big-Bang
 - ★ Horizon
 - ★ Platitude
 - ★ Monopoles
- Prédit la forme des fluctuations de densité primordiales
 - ★ Graines pour la formation des structures
 - ★ Gaussianité
 - ★ présence de modes scalaires et tenseurs
 - ★ indice spectral proche légèrement inférieur à 1
- Tous les modèles ajustés sur le CMB, les modèles de formation des structures, supposent implicitement une inflation
 - ★ On aimerait quand même vérifier ...

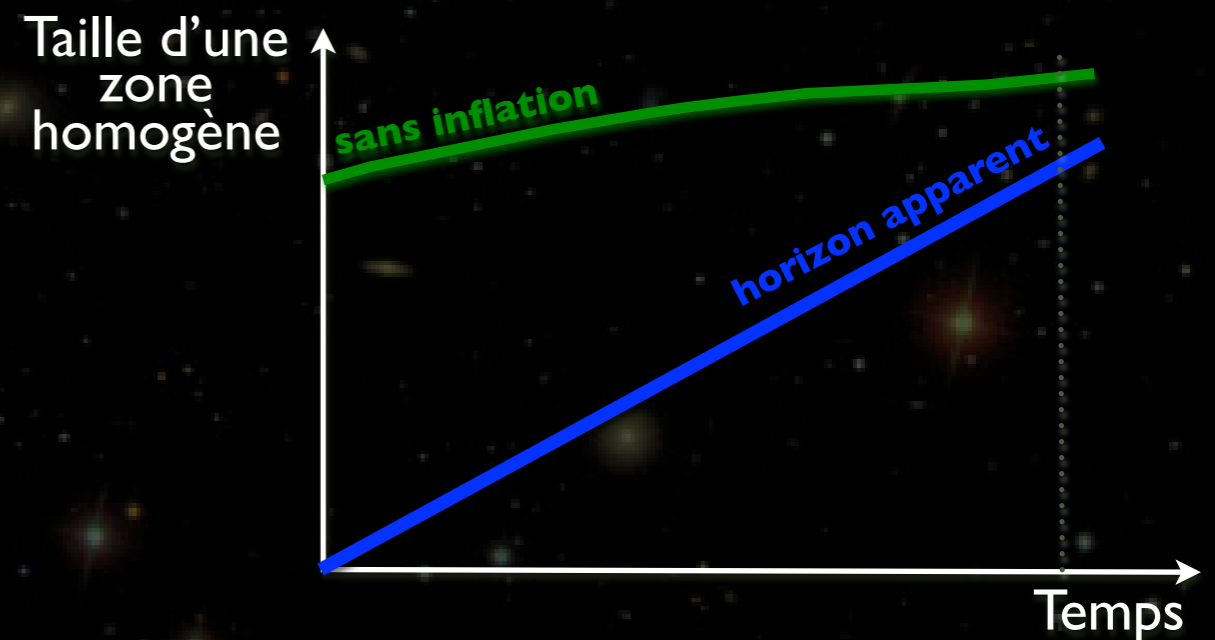
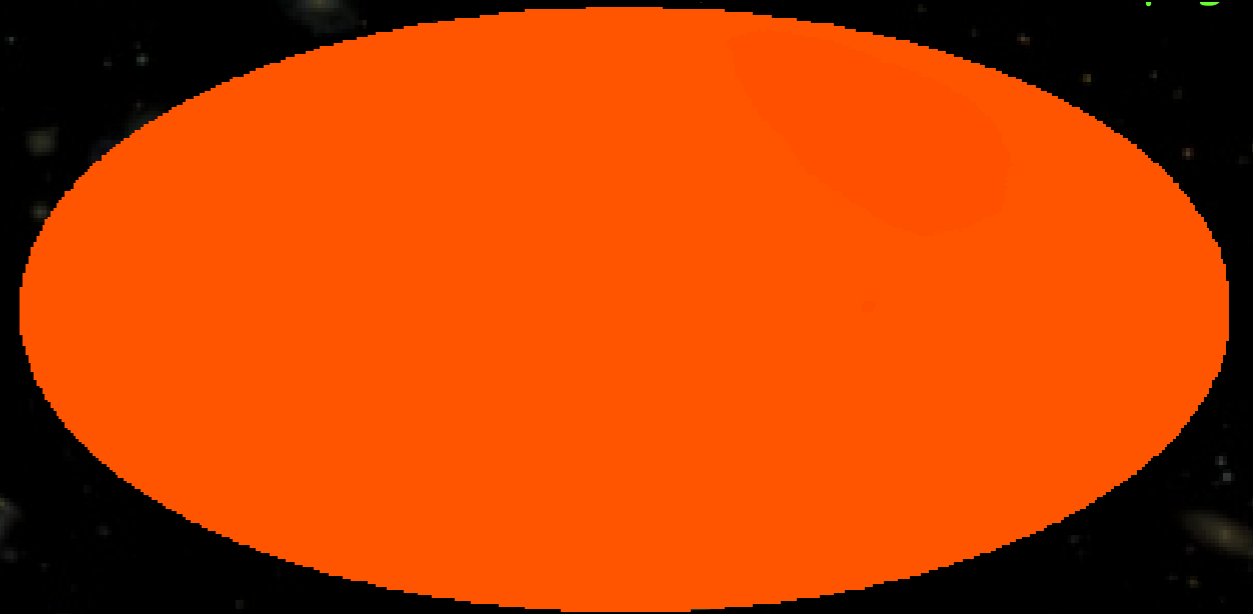
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



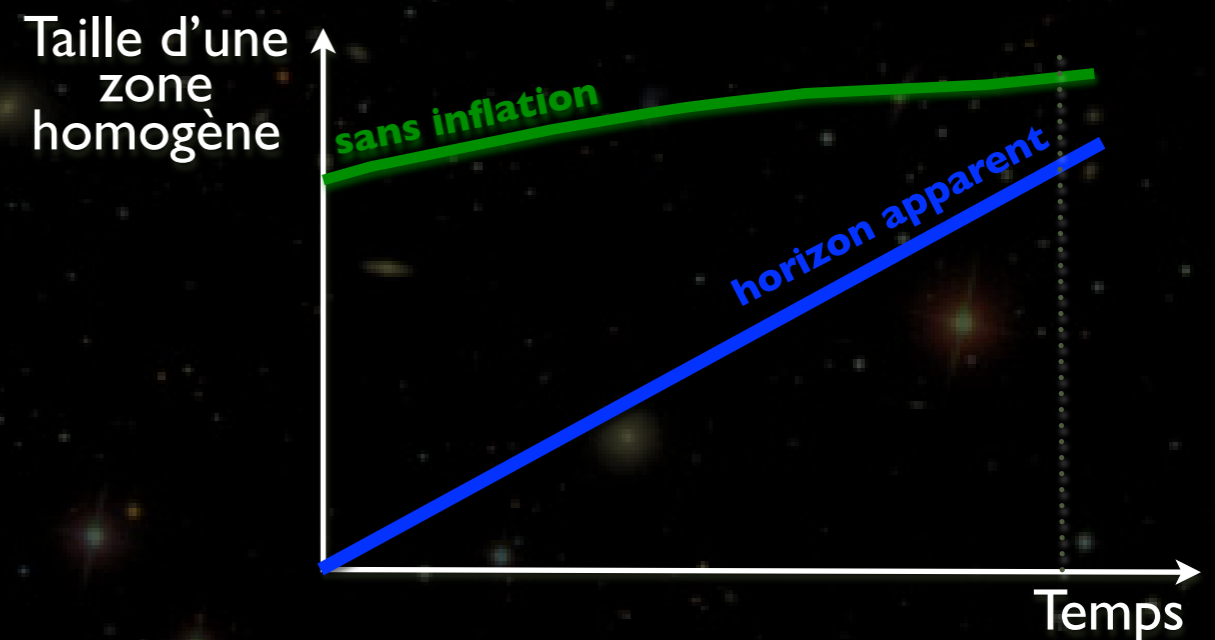
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



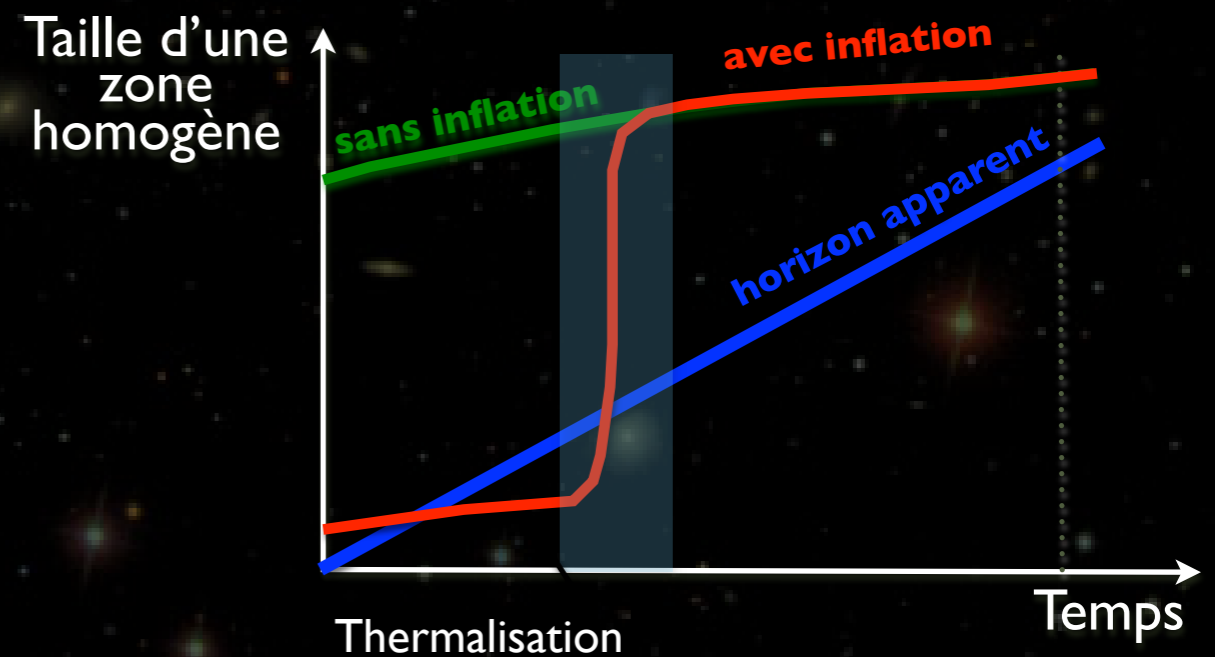
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



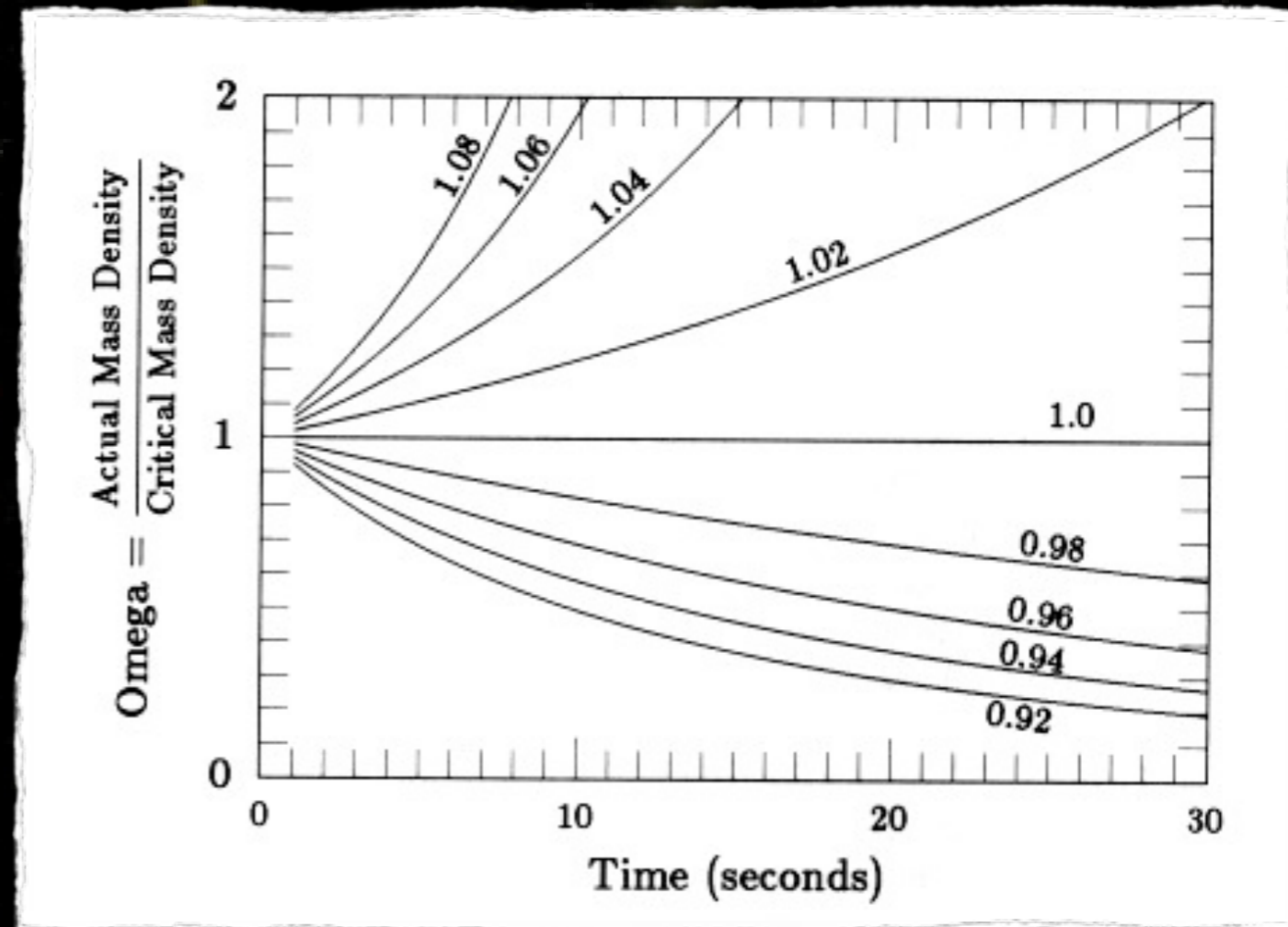
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



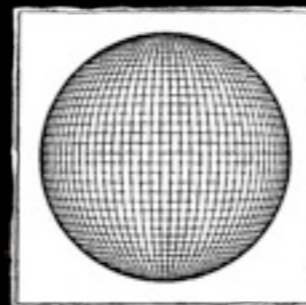
Problème de la platitude

- $\Omega_{\text{tot}}=1$ est «instable»
 - le moindre écart à la platitude à $t=0$ se traduirait aujourd'hui par un écart considérable
 - or on mesure $\Omega_{\text{tot}}=1$ avec 1% de précision !
 \Rightarrow à $t=10^{-43}$ sec : $|\Omega_{\text{tot}}-1| < 10^{-60}$



- Il faut un processus pour «aplatir» l'Univers

- **Solution : Inflation**



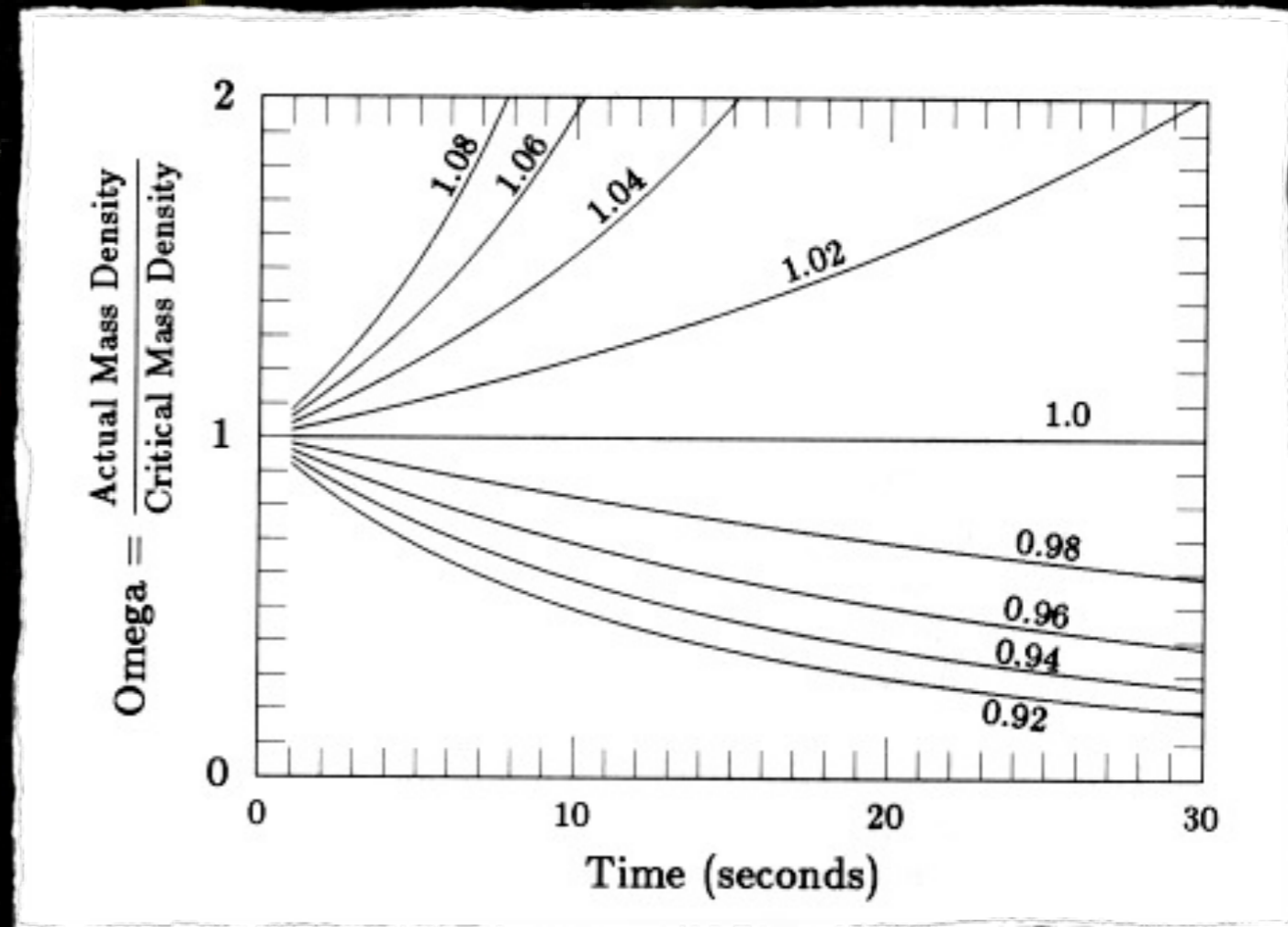
A. Guth

Problème de la platitude

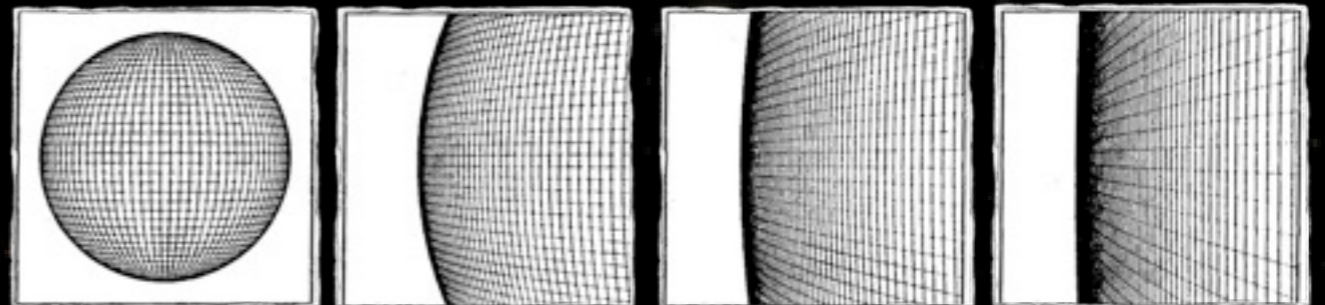
- $\Omega_{\text{tot}}=1$ est «instable»
 - le moindre écart à la platitude à $t=0$ se traduirait aujourd'hui par un écart considérable
 - or on mesure $\Omega_{\text{tot}}=1$ avec 1% de précision !

⇒ à $t=10^{-43}$ sec : $|\Omega_{\text{tot}}-1| < 10^{-60}$

- Il faut un processus pour «aplatir» l'Univers



- **Solution : Inflation**

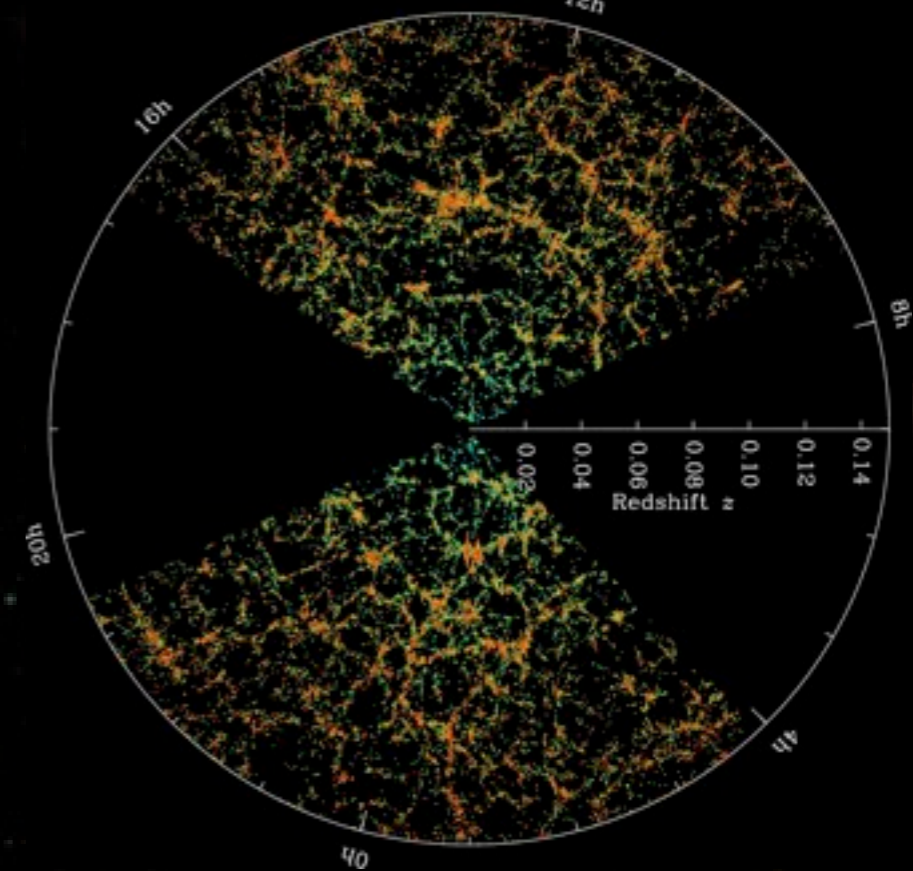


A. Guth

D'où viennent les structures ?

- On observe de nombreuses structures denses autour de nous (galaxies, amas, filaments)
- le Big-Bang «simple» n'explique pas leur origine
- si on «suppose» les graines alors on explique bien les structures
- Deux alternatives :
 - ★ conditions initiales ad-hoc
 - ★ processus permettant de les générer : **L'inflation**

Galaxies dans une tranche en déclinaison de SDSS

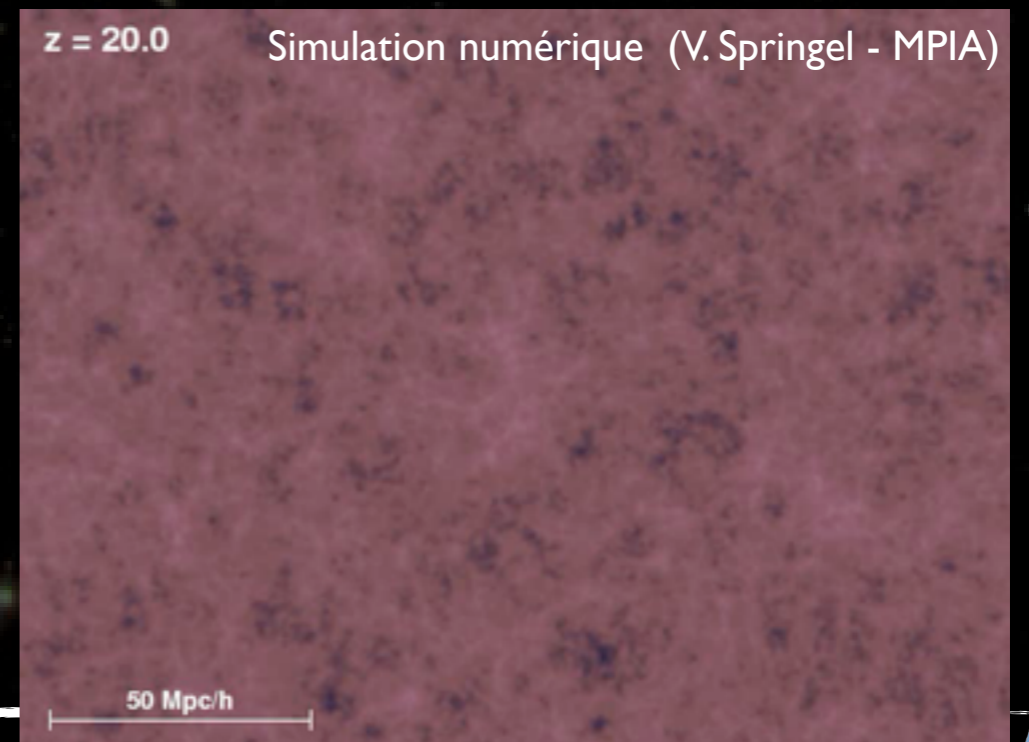
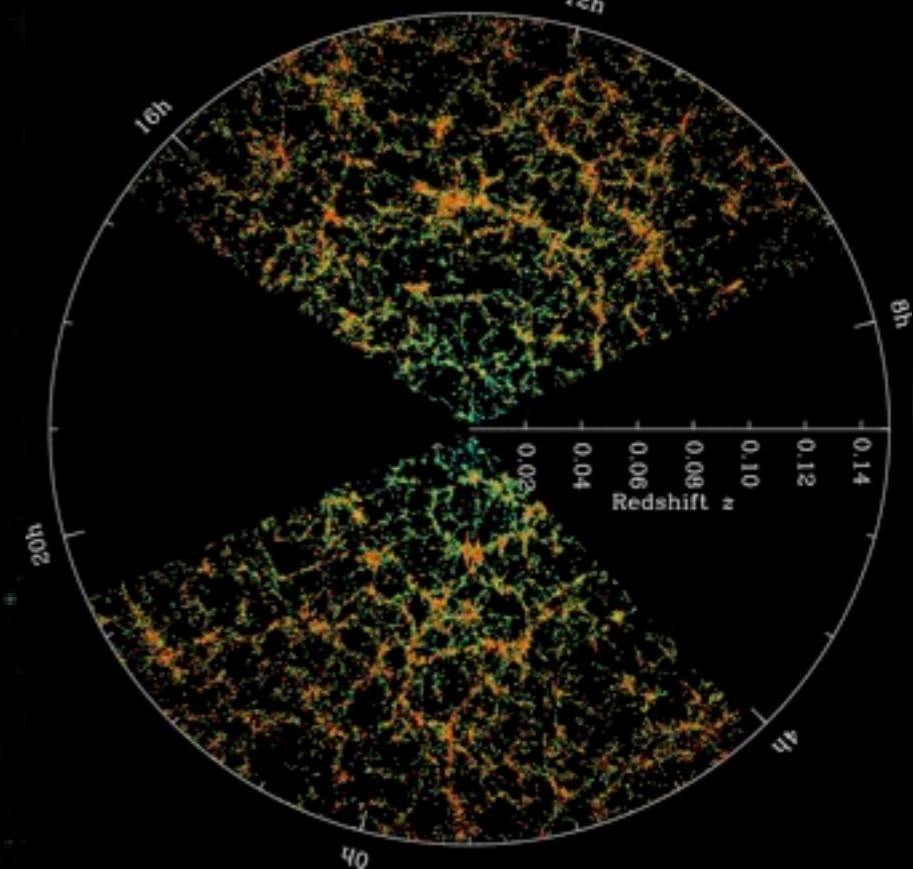


Simulation numérique (V. Springel - MPIA)

D'où viennent les structures ?

- On observe de nombreuses structures denses autour de nous (galaxies, amas, filaments)
- le Big-Bang «simple» n'explique pas leur origine
- si on «suppose» les graines alors on explique bien les structures
- Deux alternatives :
 - ★ conditions initiales ad-hoc
 - ★ processus permettant de les générer : **L'inflation**

Galaxies dans une tranche en déclinaison de SDSS



Fluctuations primordiales : où en sommes nous ?

<ul style="list-style-type: none">● Nature des perturbations:<ul style="list-style-type: none">★ Pics de TT superposés aux creux de EE➔ Perturbations adiabatiques	✓
<ul style="list-style-type: none">● Indice spectral $P(k) \propto k^{n_s-1}$<ul style="list-style-type: none">★ QUAD+WMAP+ACBAR+SDSS$n_s = 0.967^{+0.013}_{-0.013}$➔ Spectre presque invariant d'échelle	✓
<ul style="list-style-type: none">● Gaussianités<ul style="list-style-type: none">★ Aucun indice convaincant de non-gaussianité	✓
<ul style="list-style-type: none">● Perturbations tensorielles<ul style="list-style-type: none">★ Pas de détection	?

Conclusion

