

40 ans de cosmologie



Jean-Christophe Hamilton
APC - CNRS - IN2P3 - Université Paris-Diderot

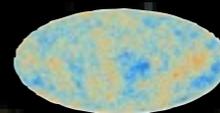
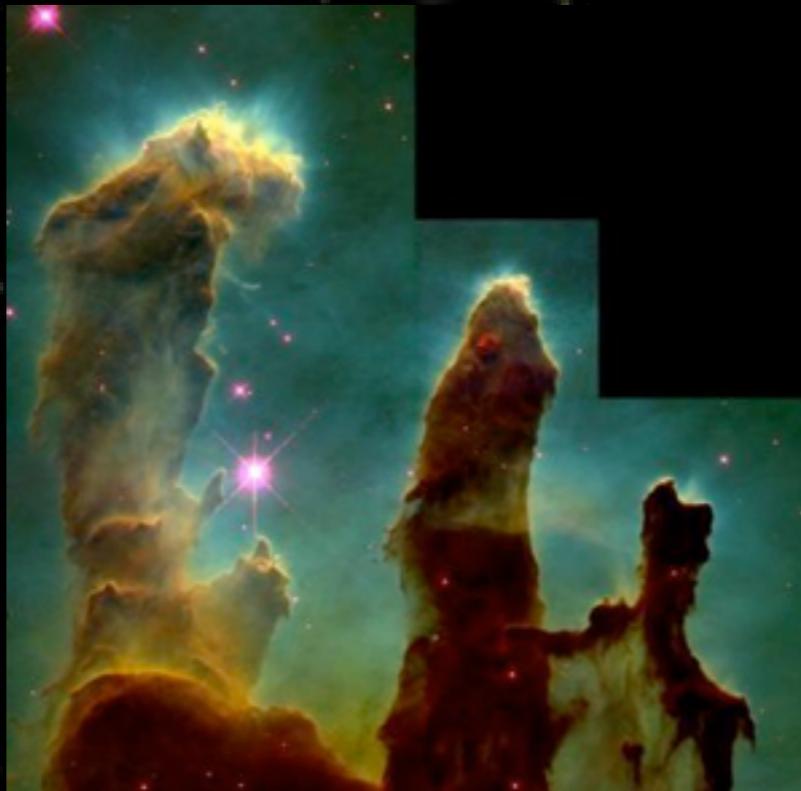
100 ans de cosmologie



Jean-Christophe Hamilton
APC - CNRS - IN2P3 - Université Paris-Diderot

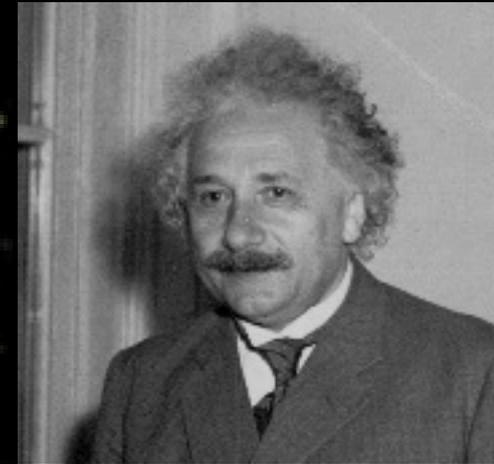
Les piliers de la cosmologie

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

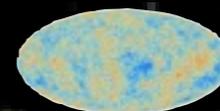


un Univers courbe !

- 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

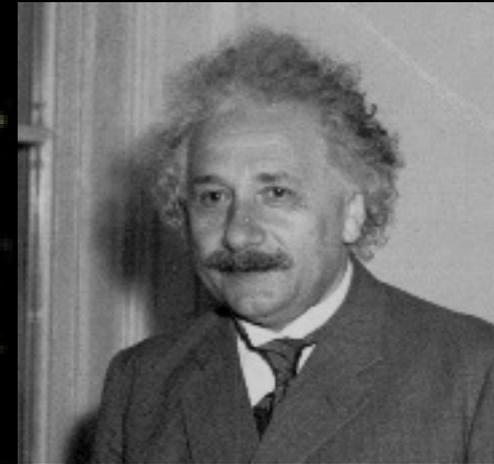


A. Einstein

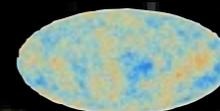
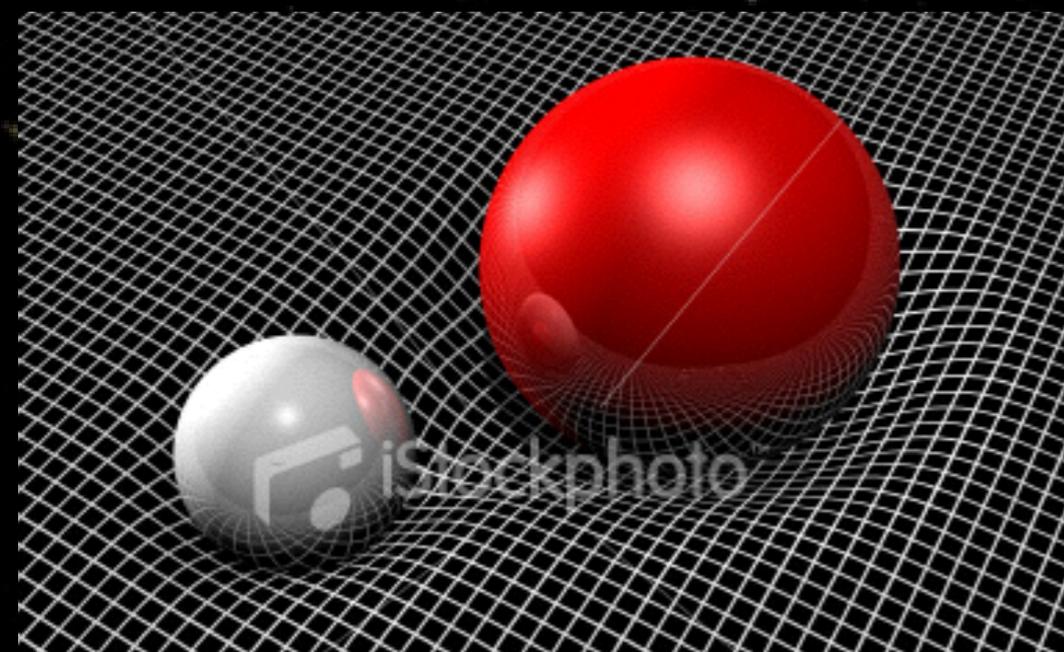


un Univers courbe !

- 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

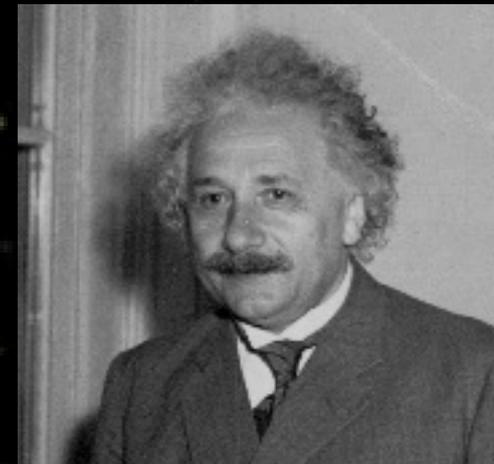


A. Einstein

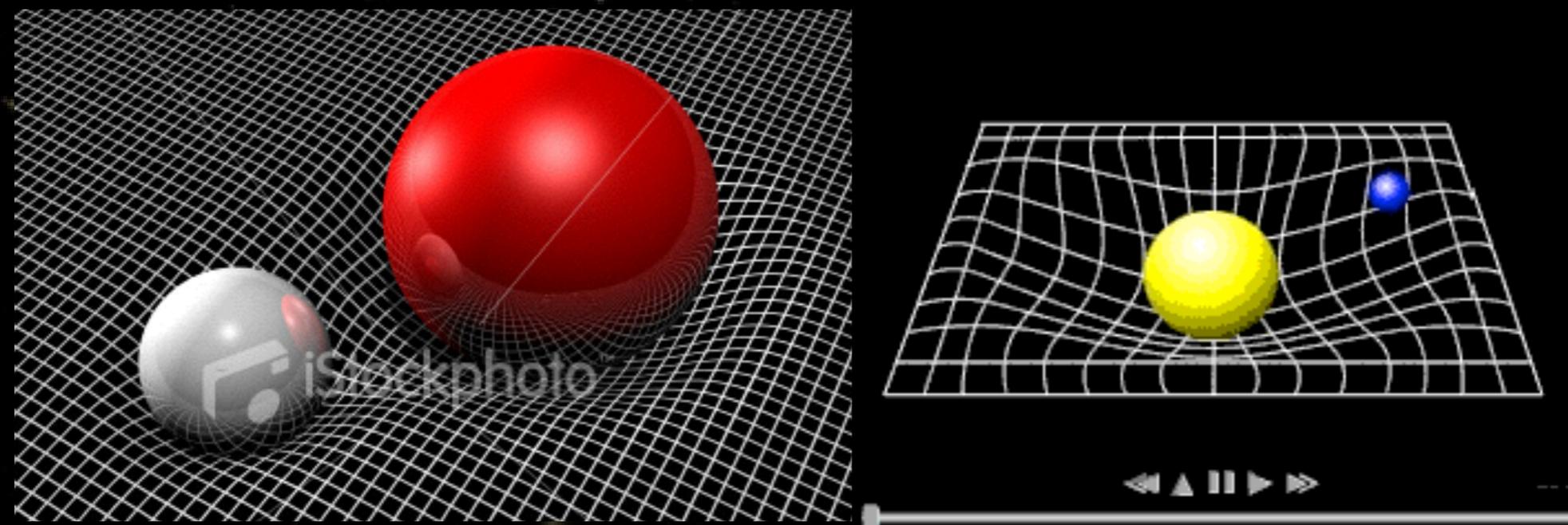


un Univers courbe !

- 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

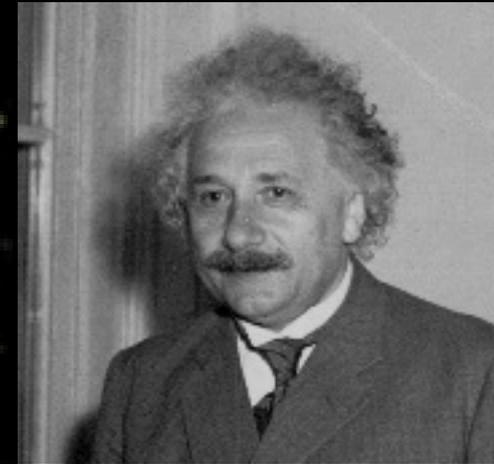


A. Einstein

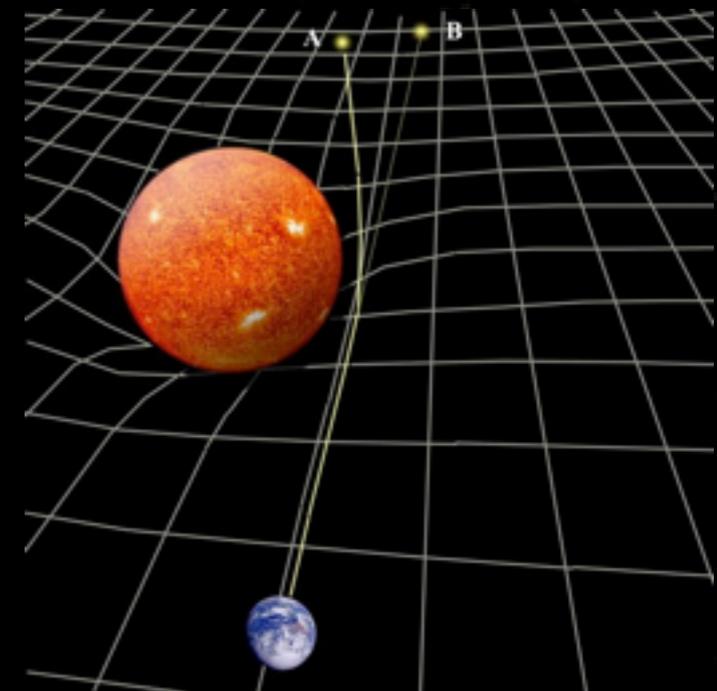
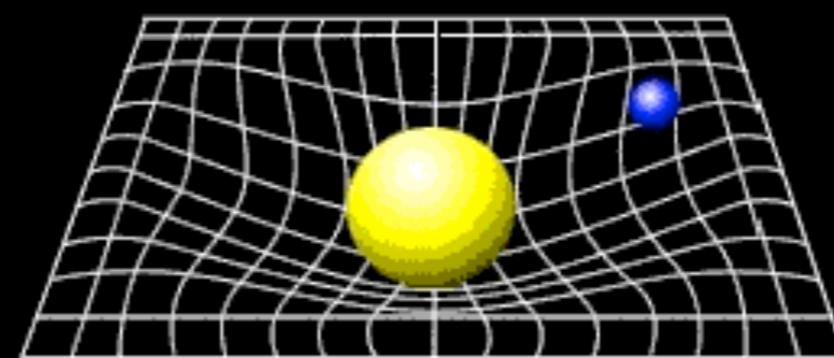
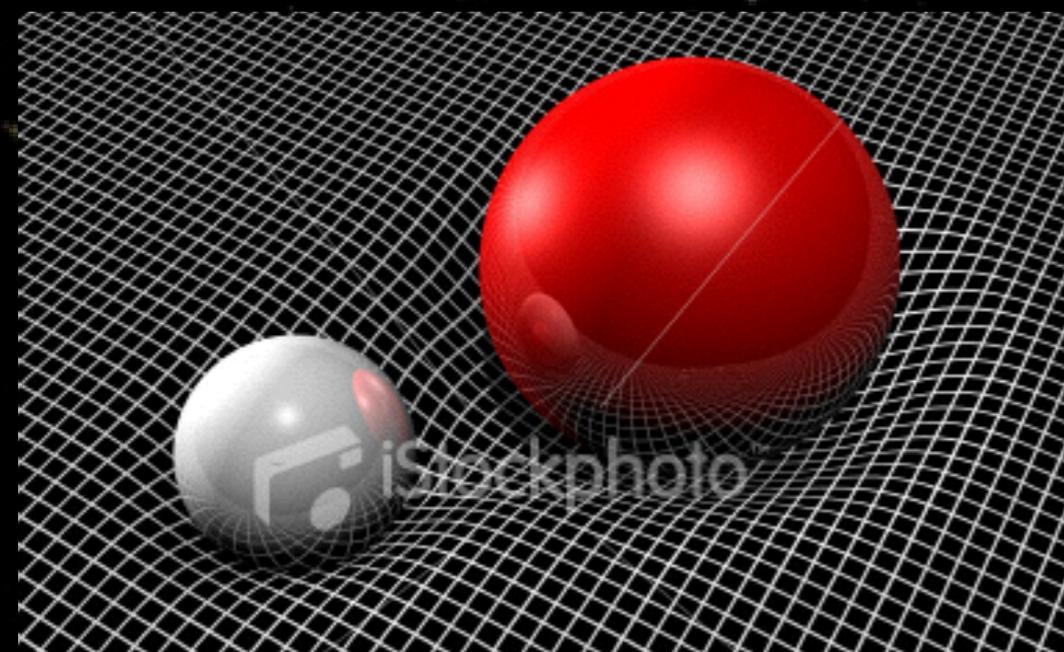


un Univers courbe !

- 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



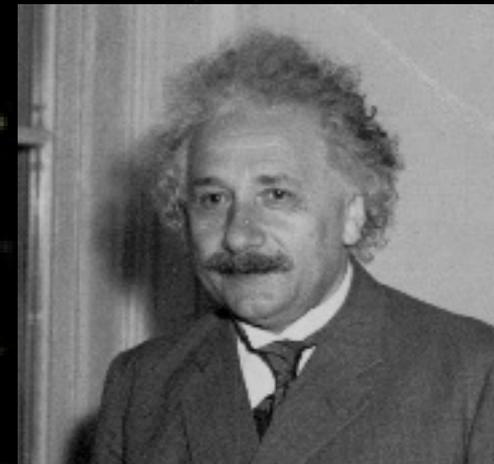
A. Einstein



un Univers courbe !

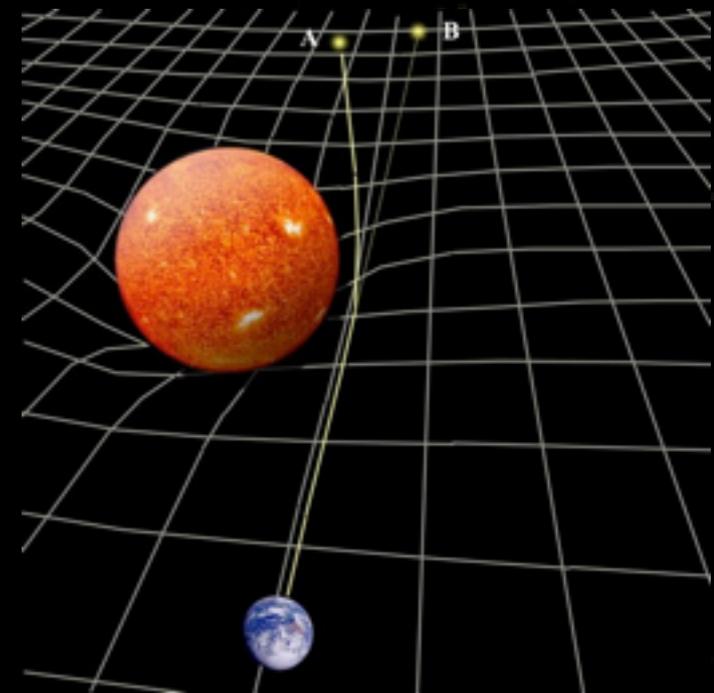
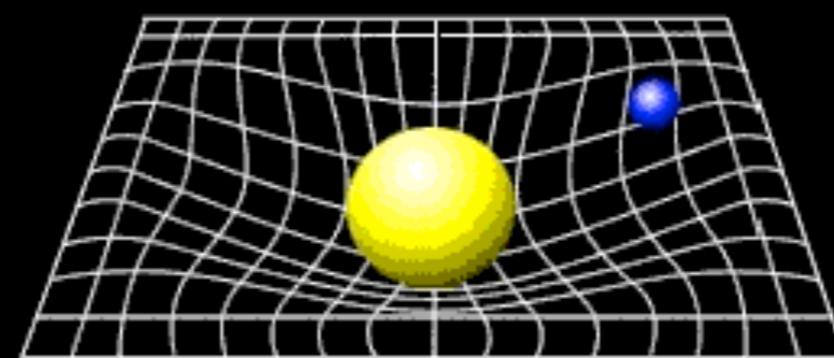
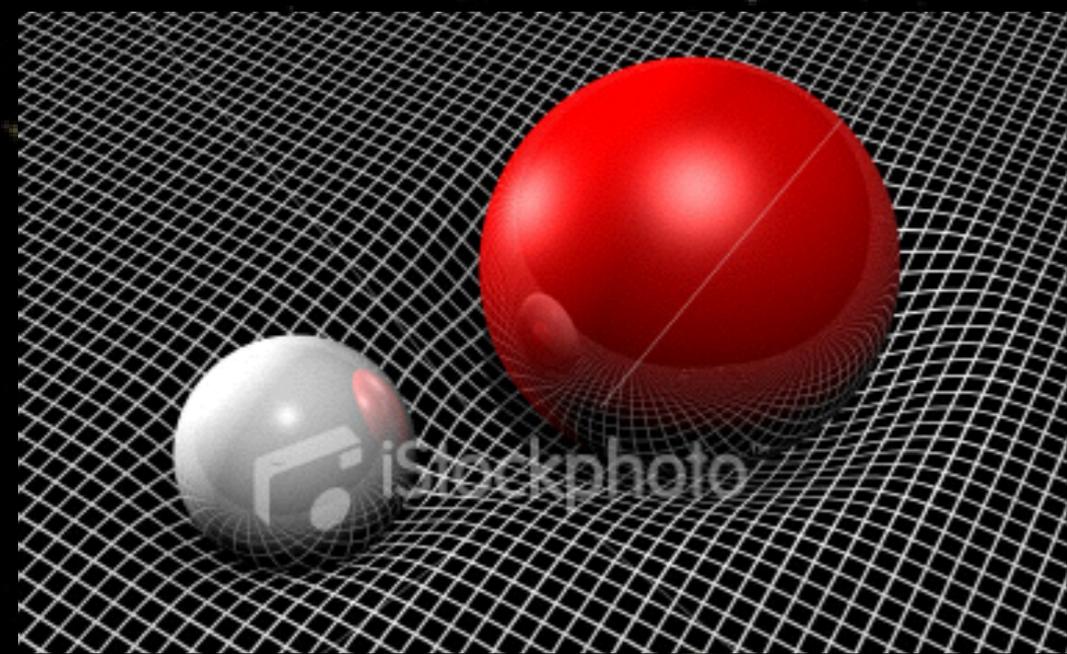
- Théorie de la relativité Générale (1915)

- ★ 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



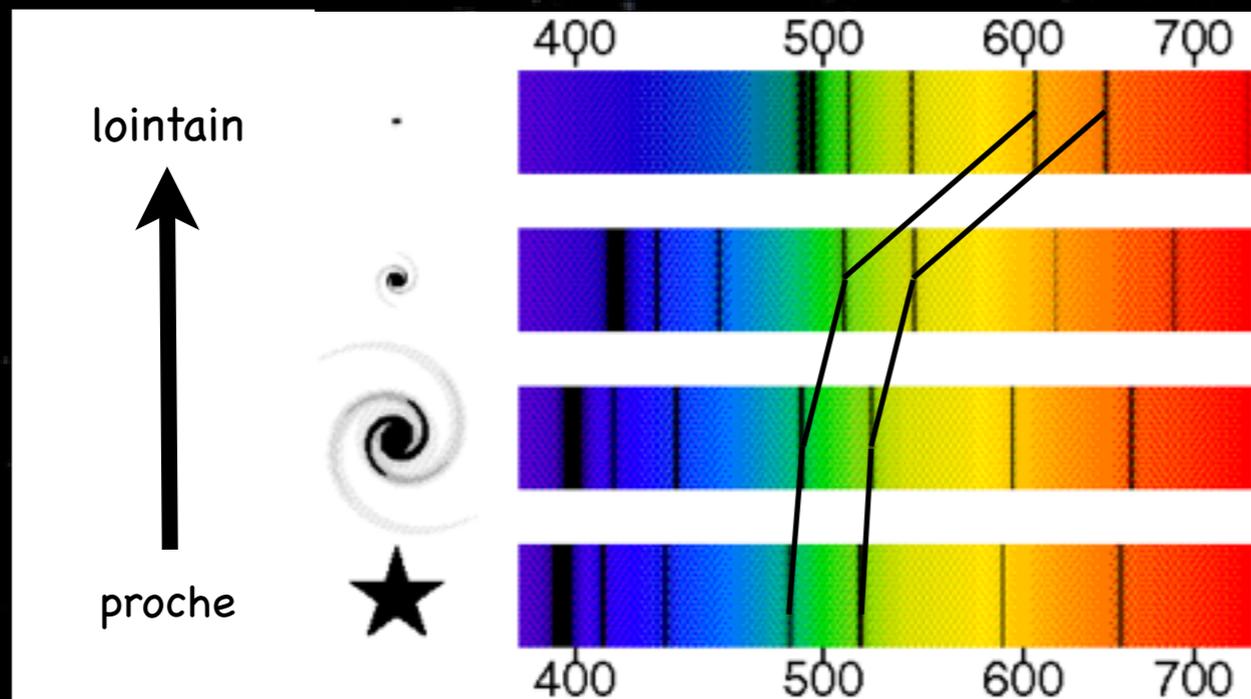
A. Einstein

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{Espace-temps}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}}_{\text{Contenu matériel}}$$



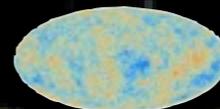
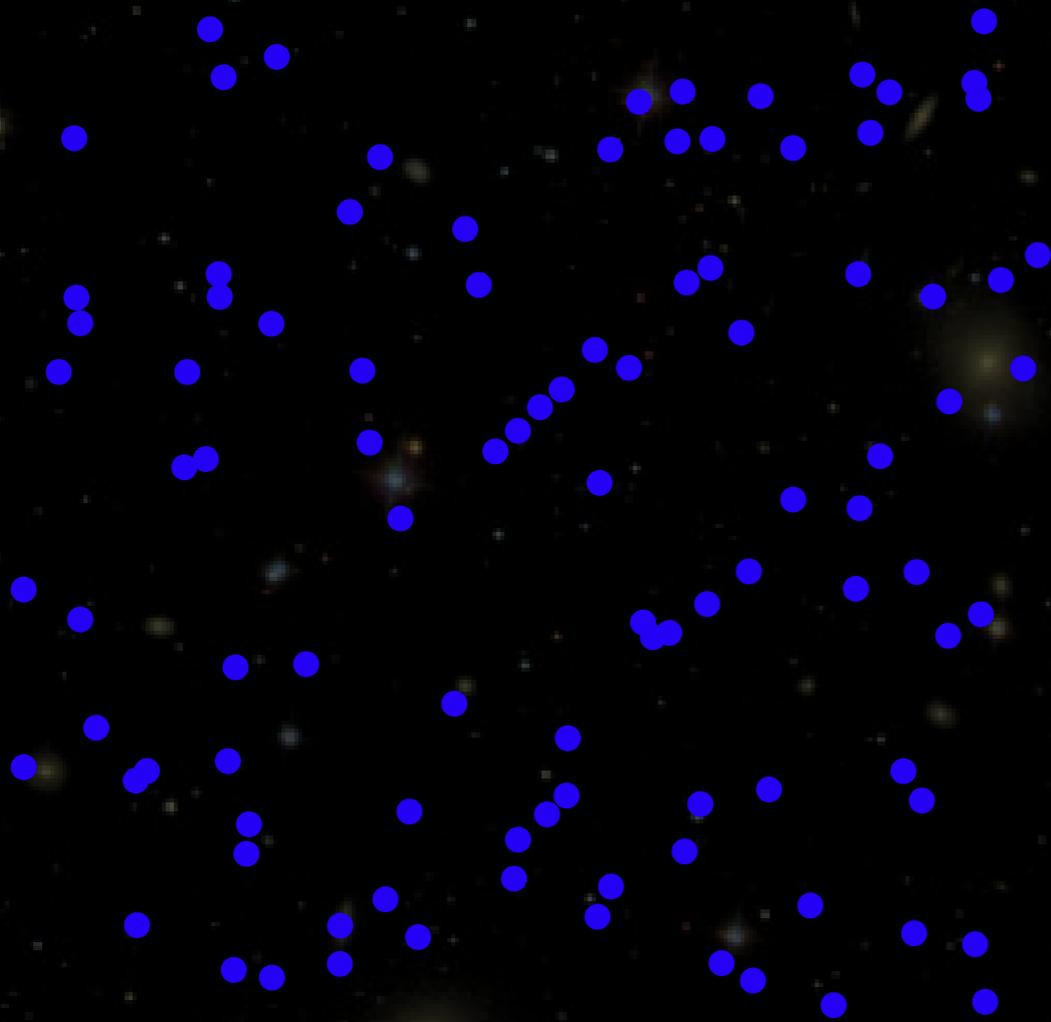
L'Univers en expansion

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

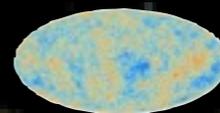
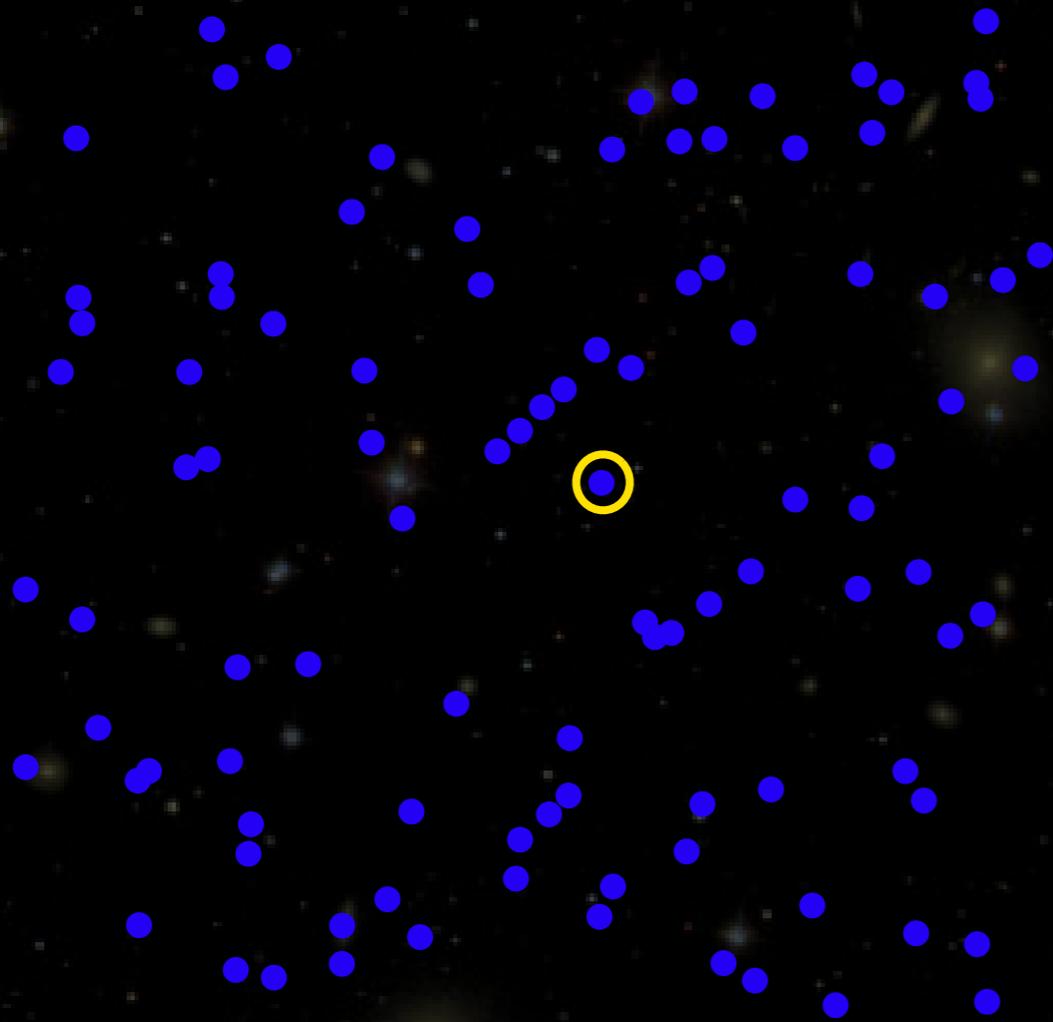


- Si ce décalage vers le rouge est interprété comme un effet Doppler :
 - La vitesse radiale des galaxies est proportionnelle à leur distance : loi de Hubble $v = H_0 \times d$

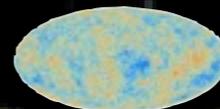
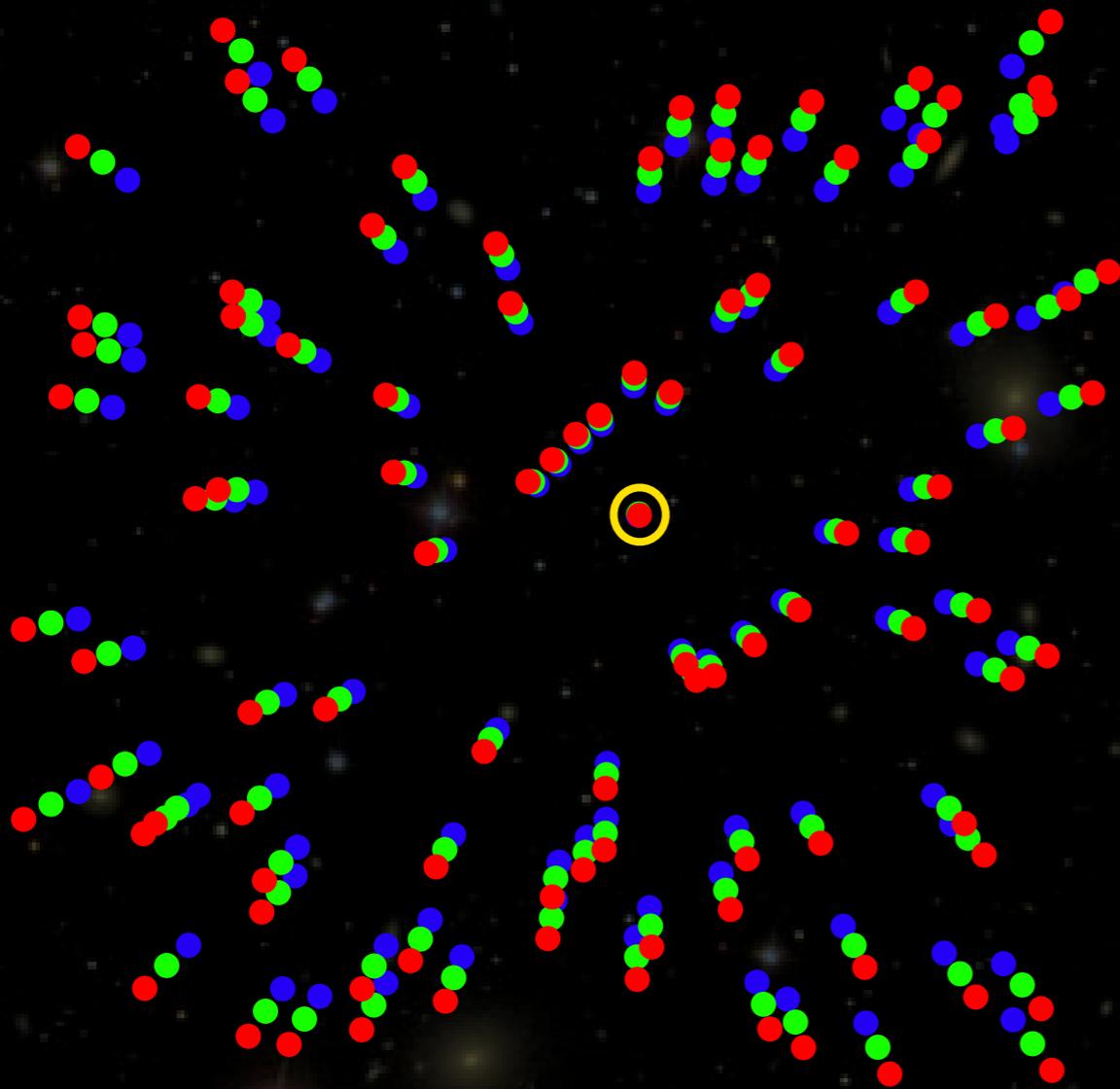
L'expansion est globale



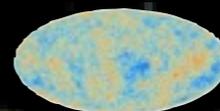
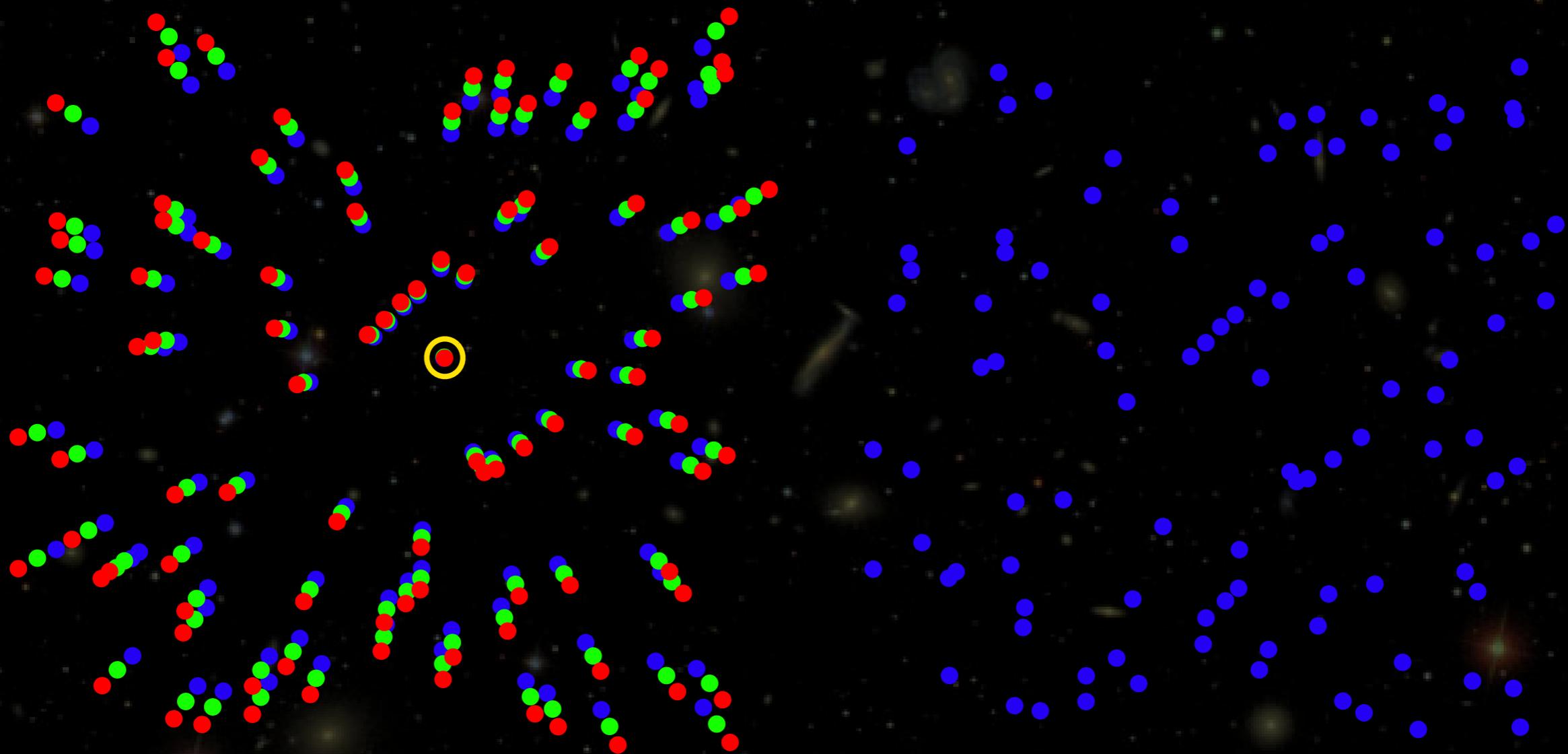
L'expansion est globale



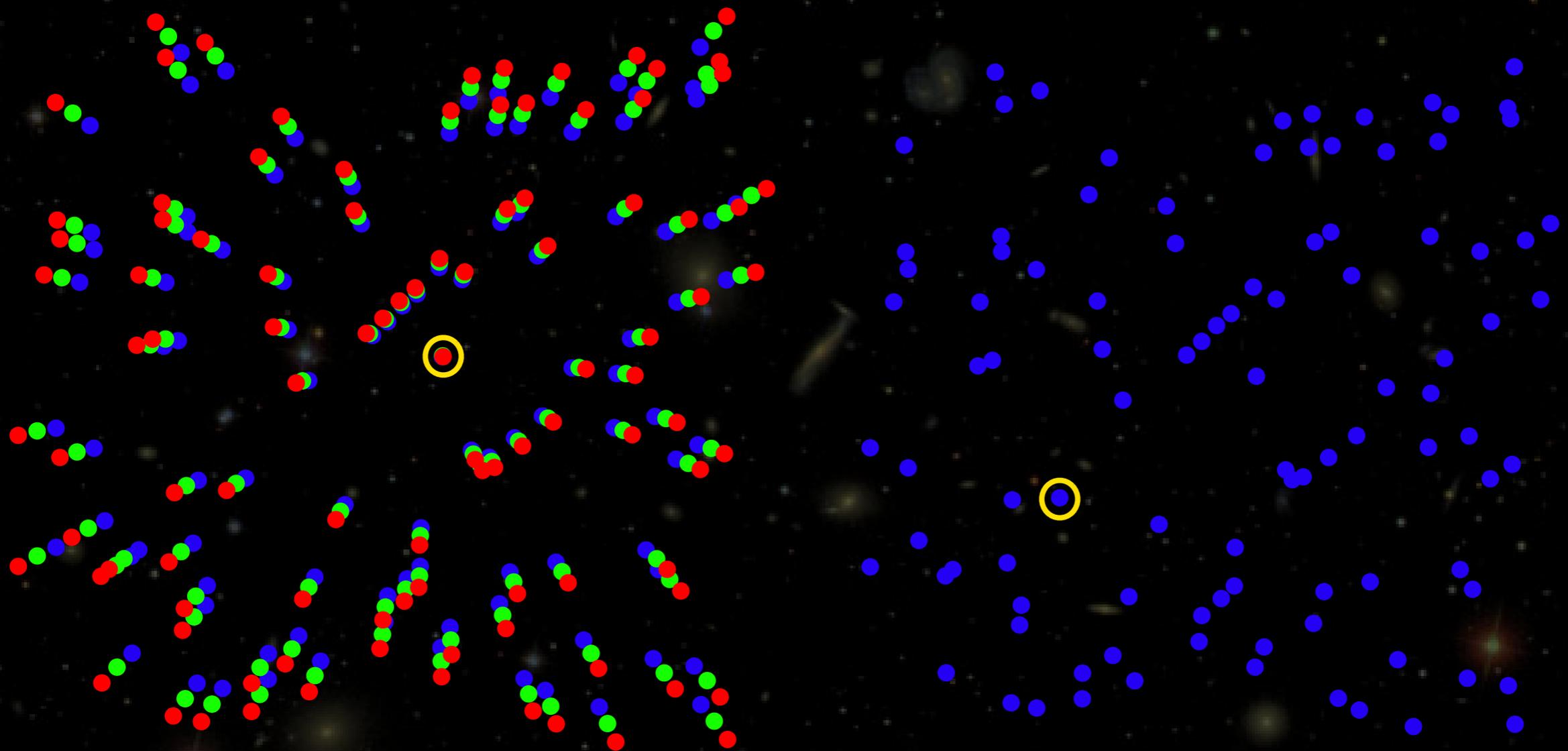
L'expansion est globale



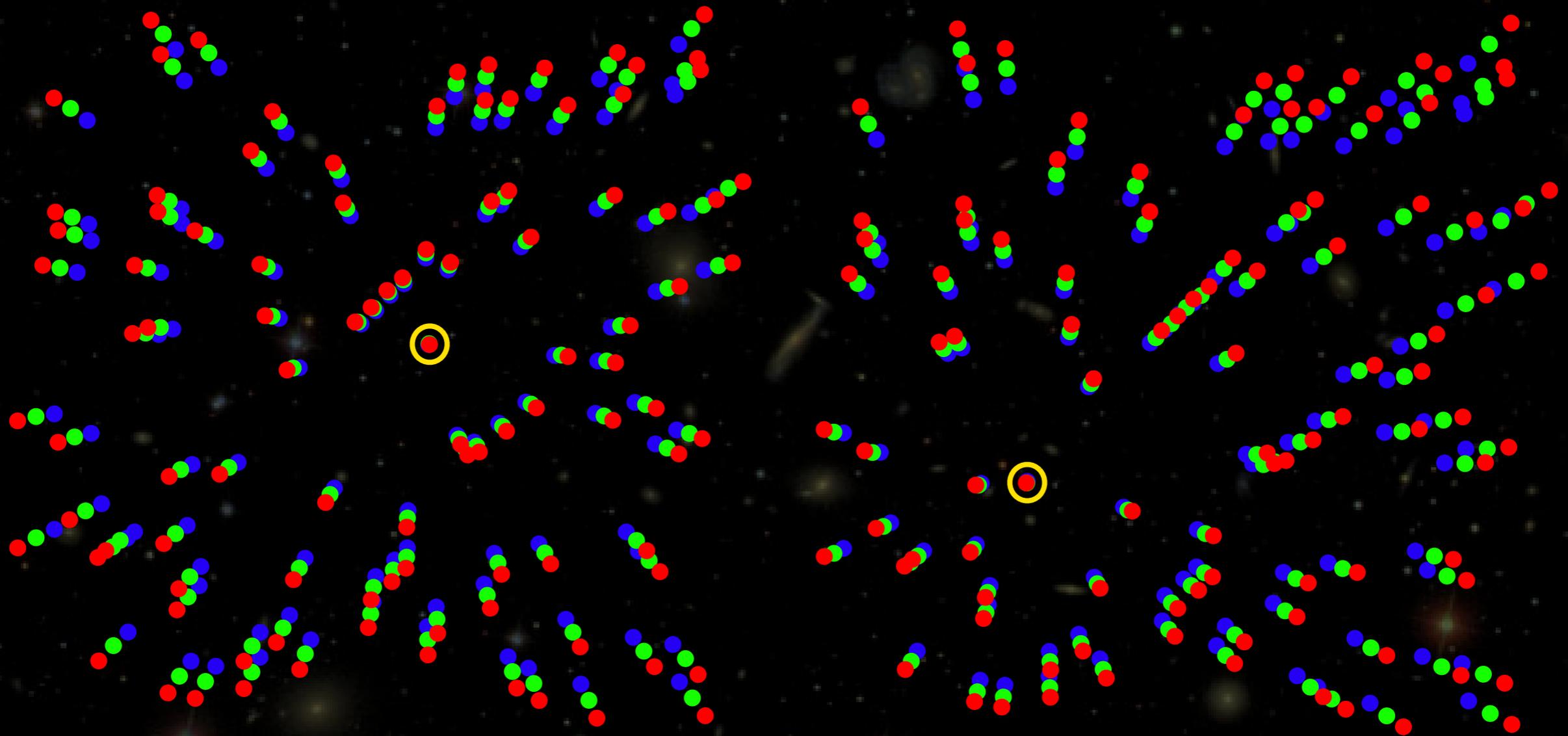
L'expansion est globale



L'expansion est globale



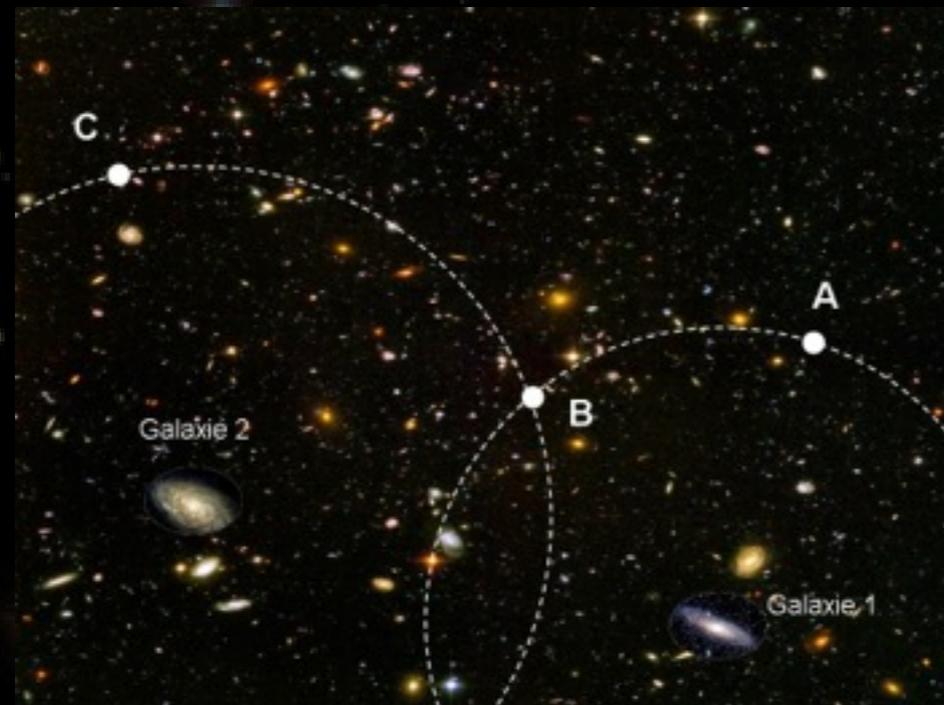
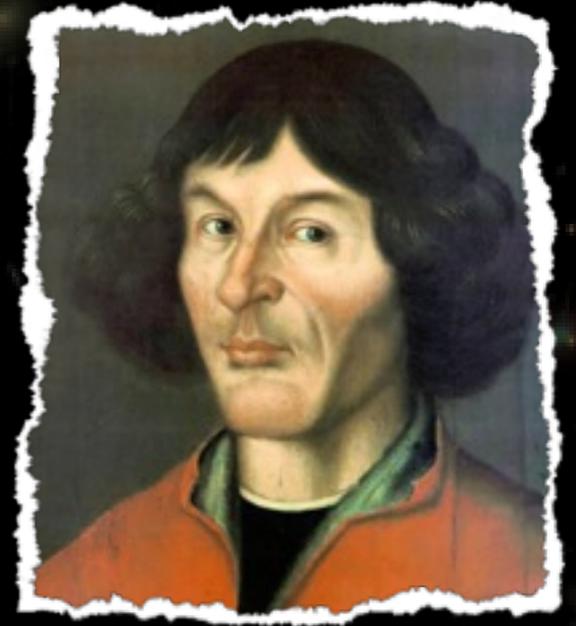
L'expansion est globale



De partout en même temps ...

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

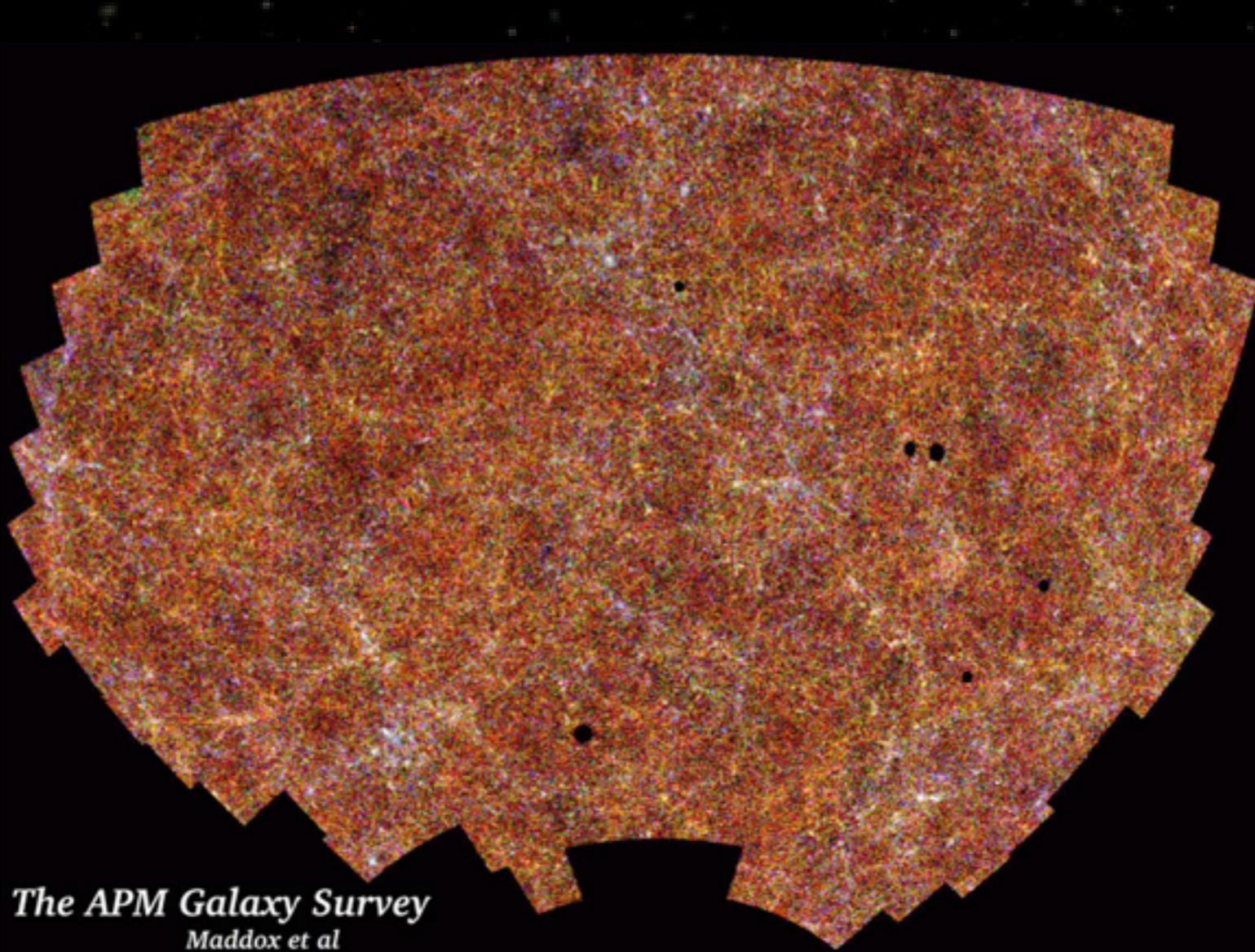
isotropie pour la galaxie 2 :
propriétés de B et C identiques

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

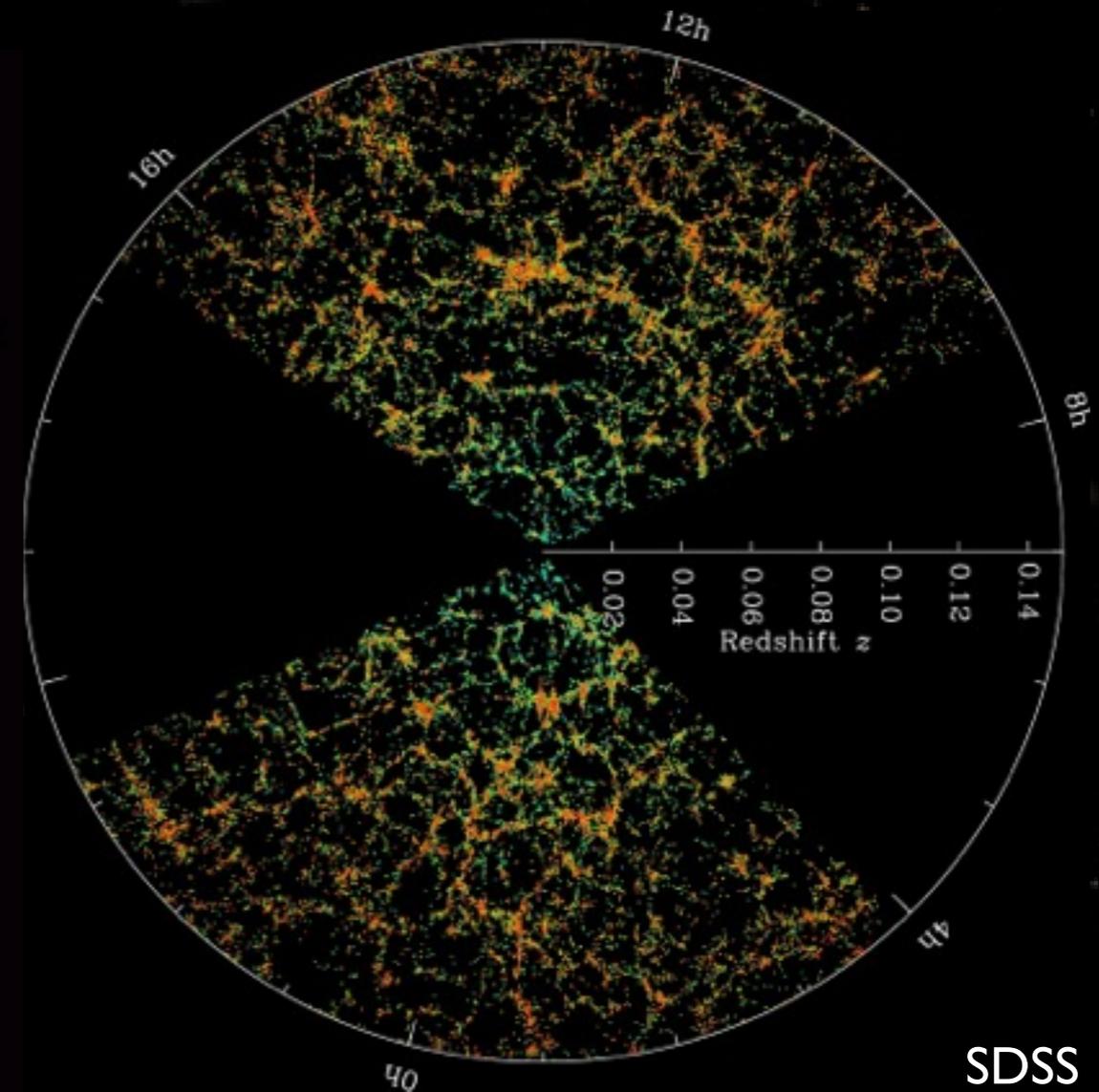
- «L'Univers est homogène et isotrope» (aux grandes échelles)

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

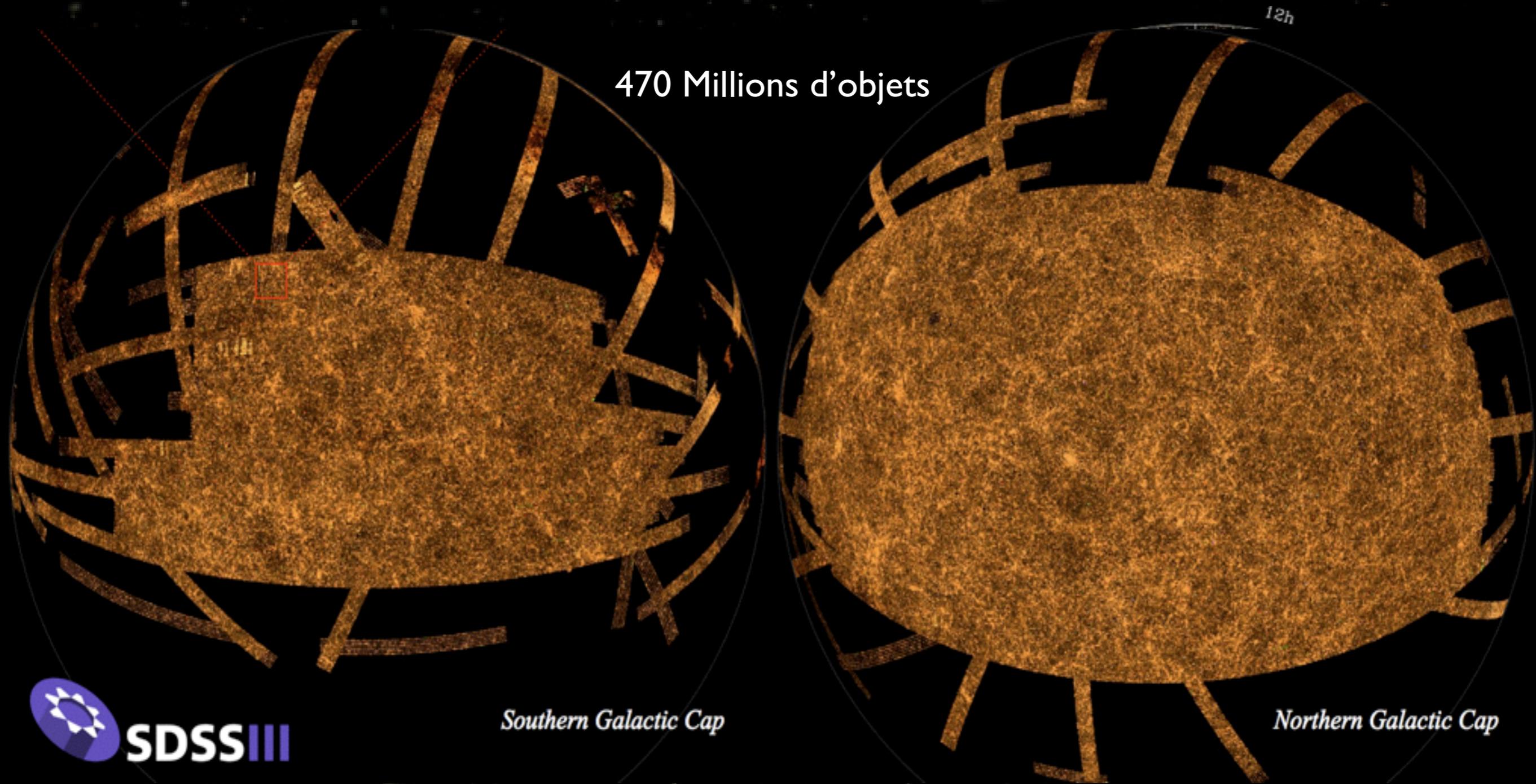


~ 2 Millions de galaxies en 3D
2Glyr de profondeur

Le principe cosmologique :

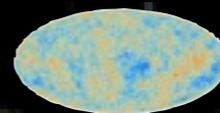
«Aux grandes échelles l'Univers est homogène et isotrope»

470 Millions d'objets



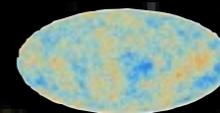
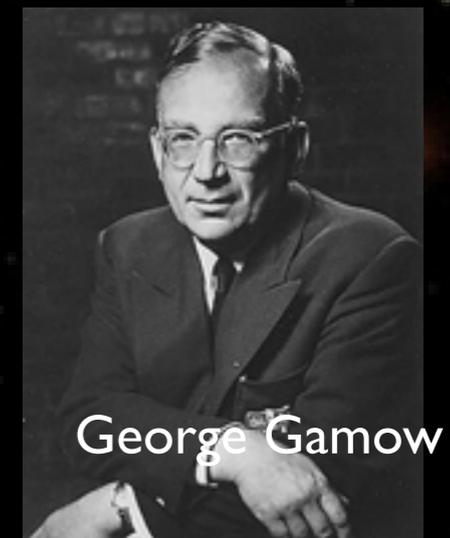
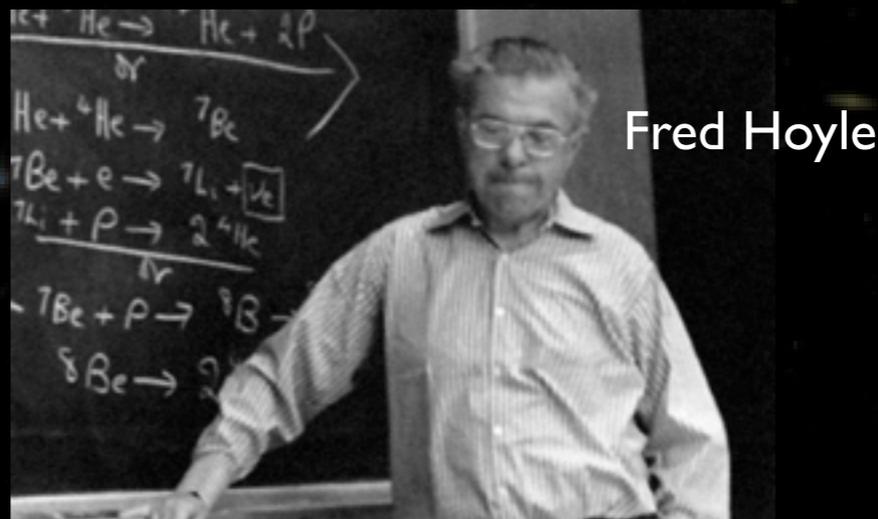
Southern Galactic Cap

Northern Galactic Cap



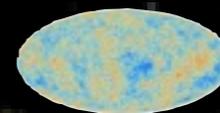
Big Bang ?

- **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: expansion
 - ★ Gamow l'étudie en détails en 1948



Évolution de l'Univers

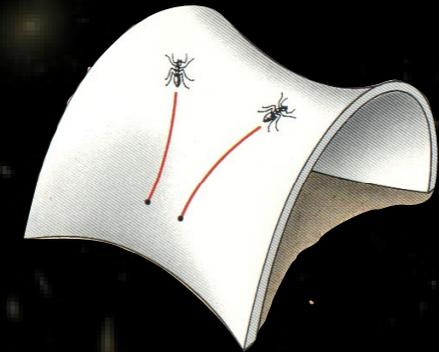
- Le principe cosmologique permet de faire des hypothèses simples
- On peut donc calculer en RG l'évolution de l'échelle de l'Univers
 - ★ Univers dynamique
 - ★ Le taux d'expansion dépend du contenu de l'Univers
 - Matière ordinaire
 - Matière noire
 - Énergie sombre
 - ★ C'est ce que l'on appelle les 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

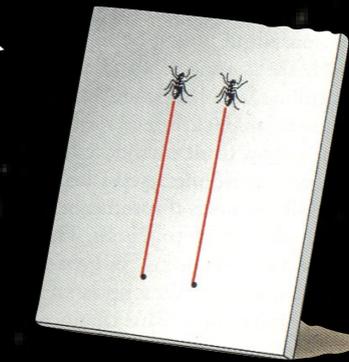
- Courbure de l'Univers: Ω_k

- ★ 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

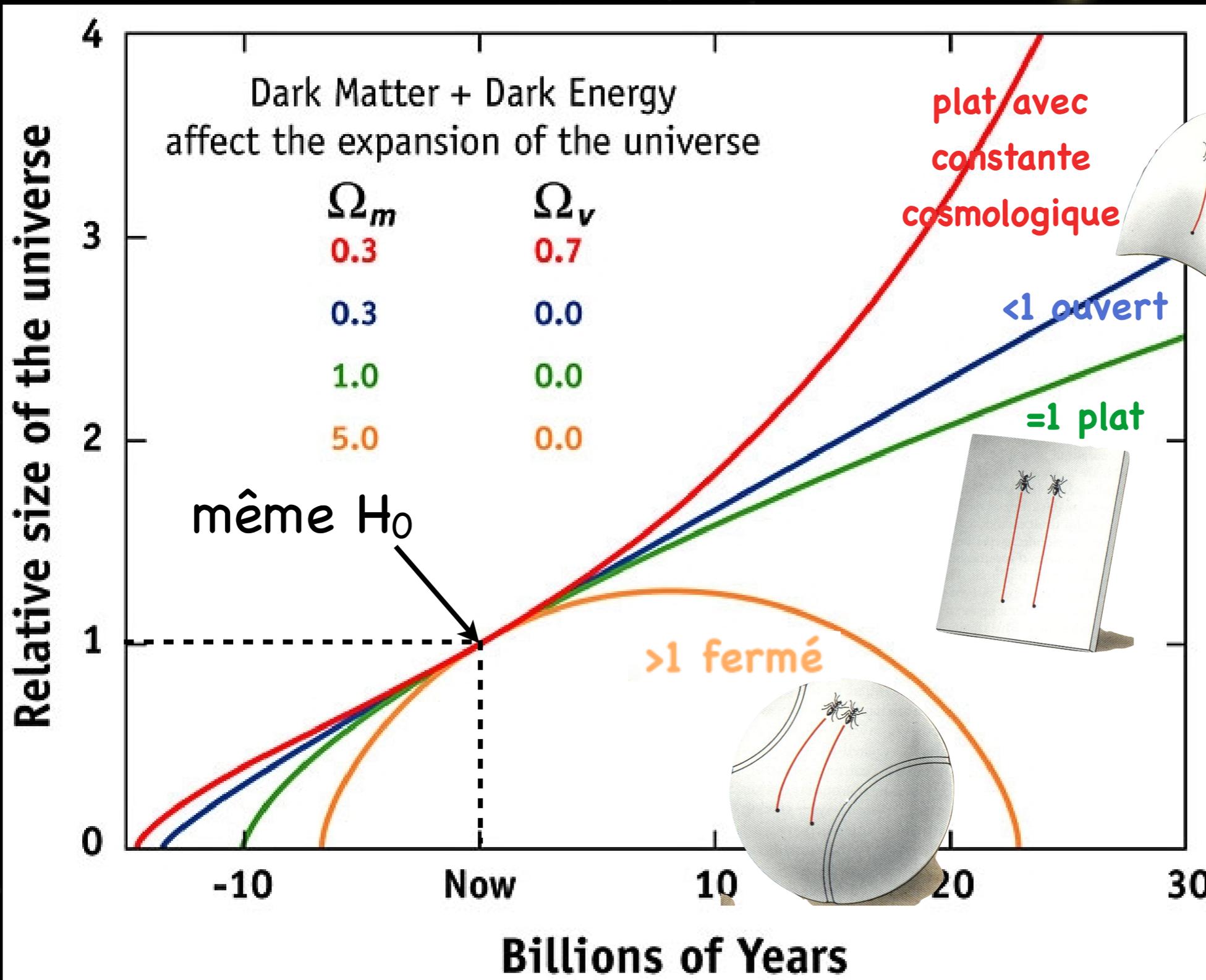


- Relation fondamentale:

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

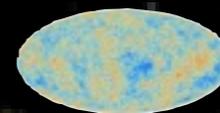
$$\text{Plat: } \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

Facteur d'échelle en FLRW

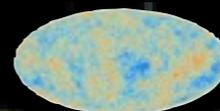


L'instant du Big-Bang ?

- Le mot big-bang est TRÈS mal choisi
 - ★ Il suggère une explosion à partir d'un point
 - ★ C'est inexact:
 - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
 - Si explosion il y a eu, alors elle a lieu partout en même temps
- Le problème de $t=0$ (et avant ?)
 - ★ La relativité générale et la mécanique quantique sont « incompatibles » quand
 - La courbure est importante
 - les distances faibles
 - c'est à dire pour $t < t_{\text{planck}} (\sim 10^{-44} \text{ sec})$
 - ★ Le temps et l'espace ne sont définis qu'après $t=0$
 - pas d'avant...
 - ★ Quand on aura une théorie quantique de la gravitation, on pourra en parler, pour l'heure ce n'est pas de la science

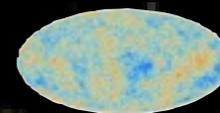
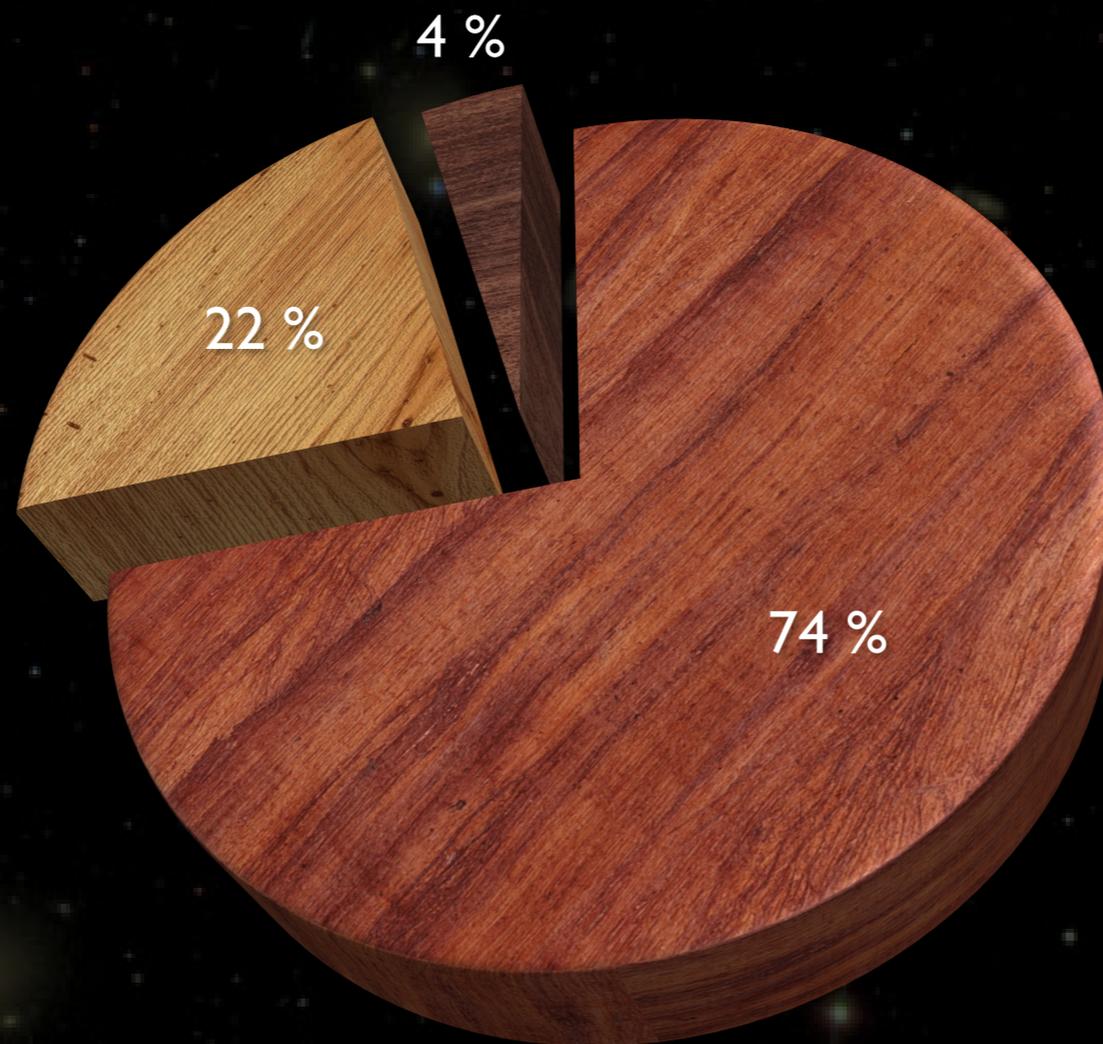


Matière noire ?



Matière noire ?

- Énergie sombre
- Matière baryonique
- Matière noire



Matière noire Galactique



Matière noire Galactique

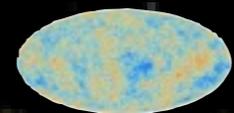
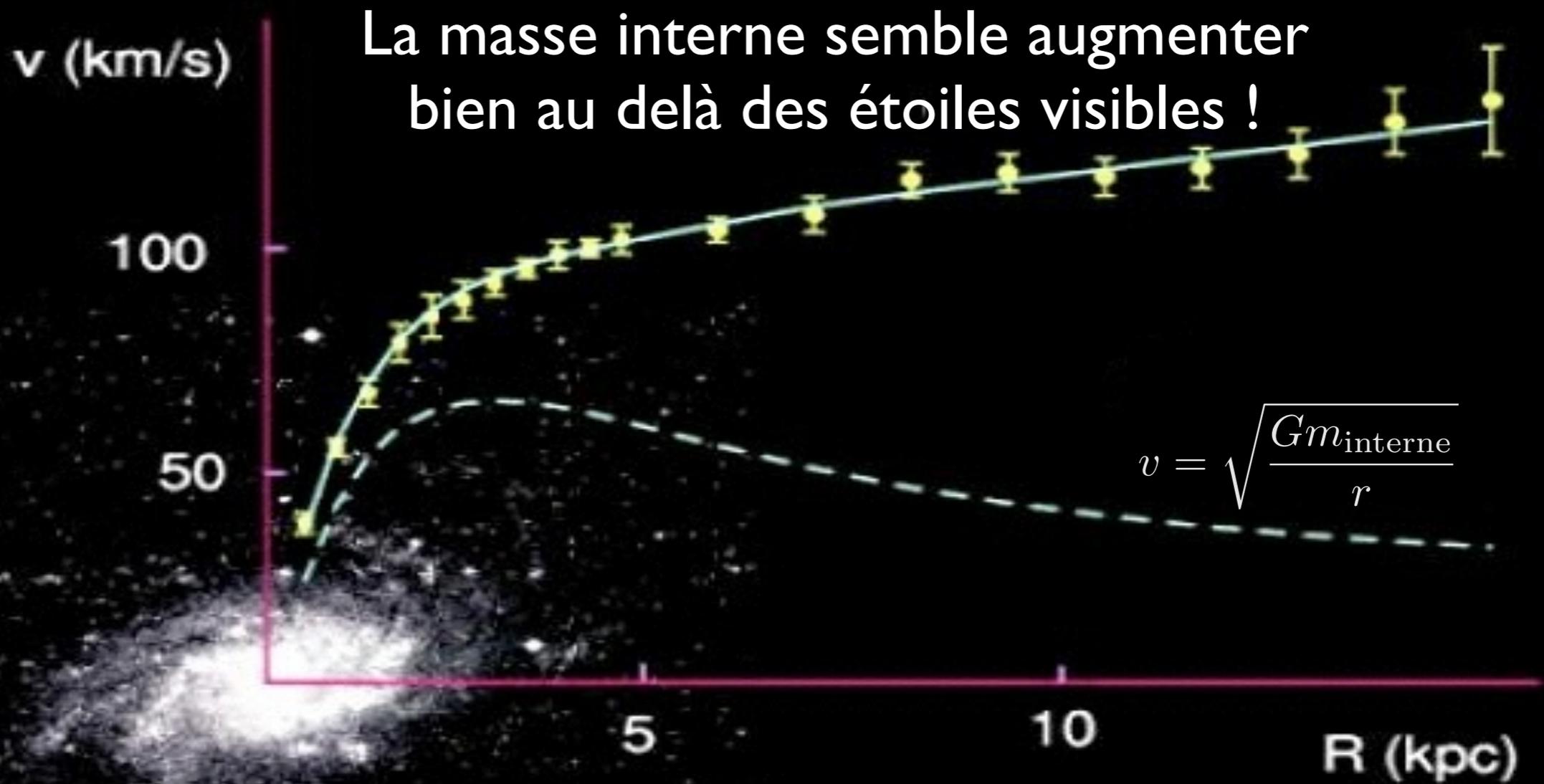
Vitesse de rotation typique
des étoiles : 200 km/s

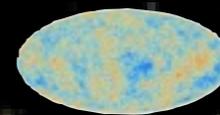
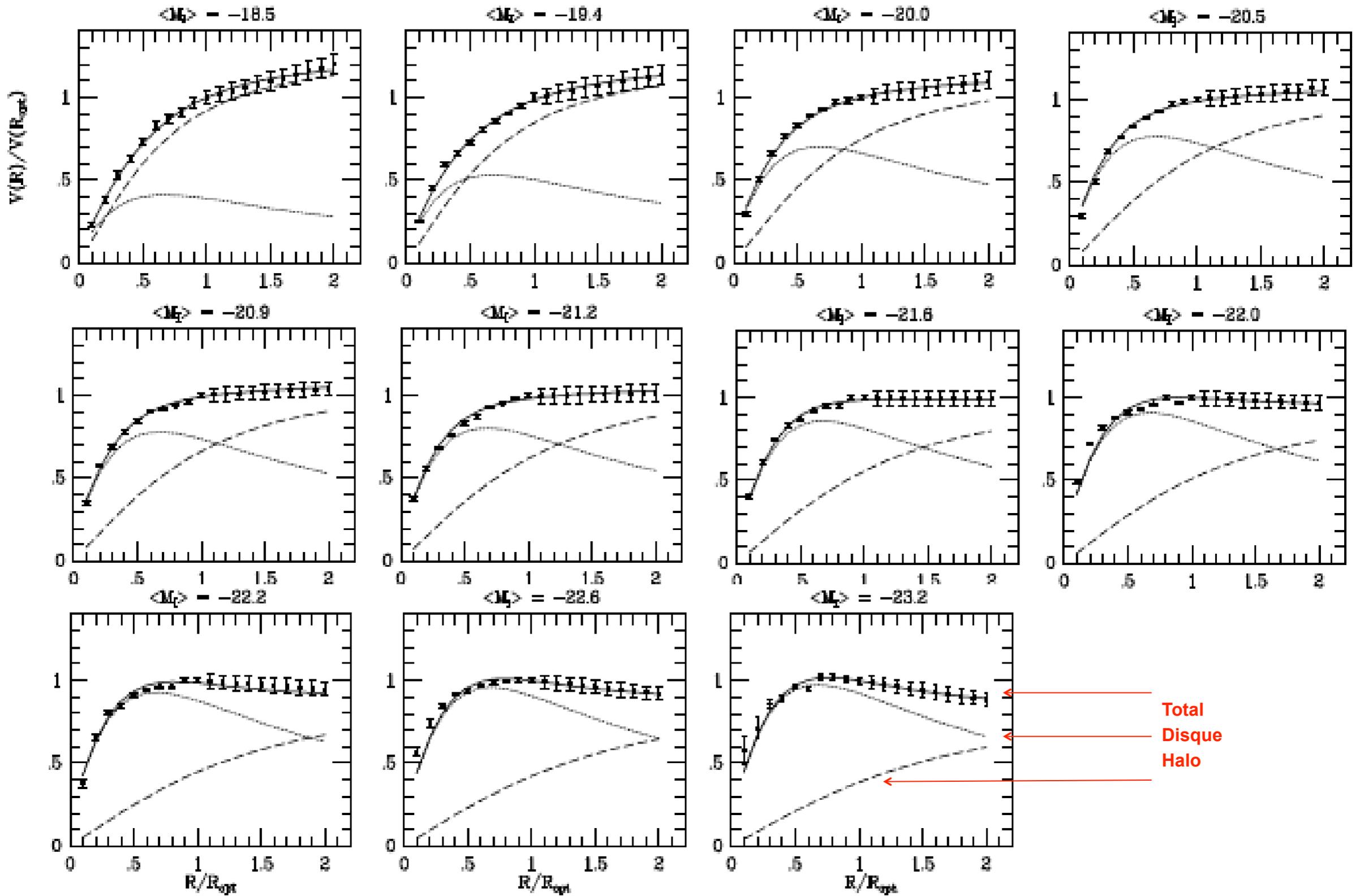


Le profil de vitesse permet
de reconstruire la masse !

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

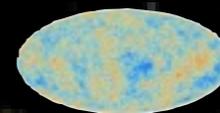
M33





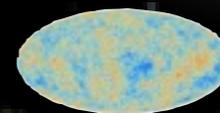
Halo de matière noire

- 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



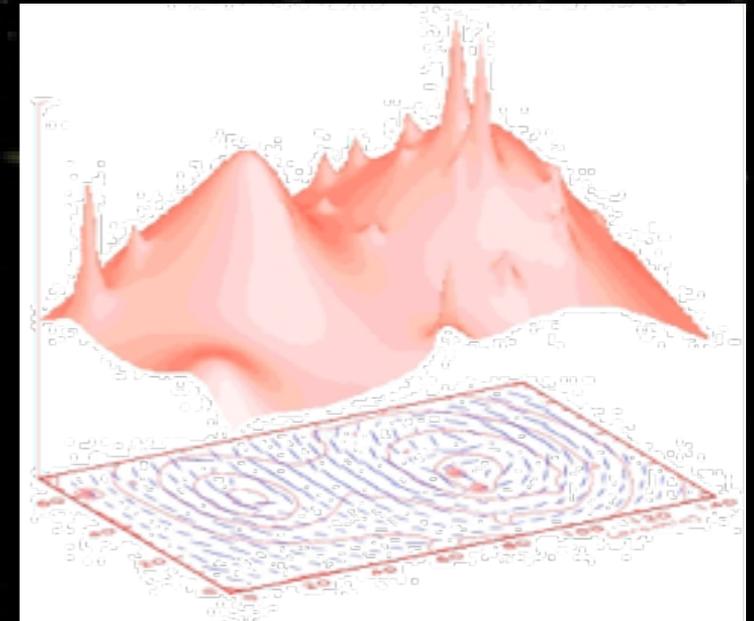
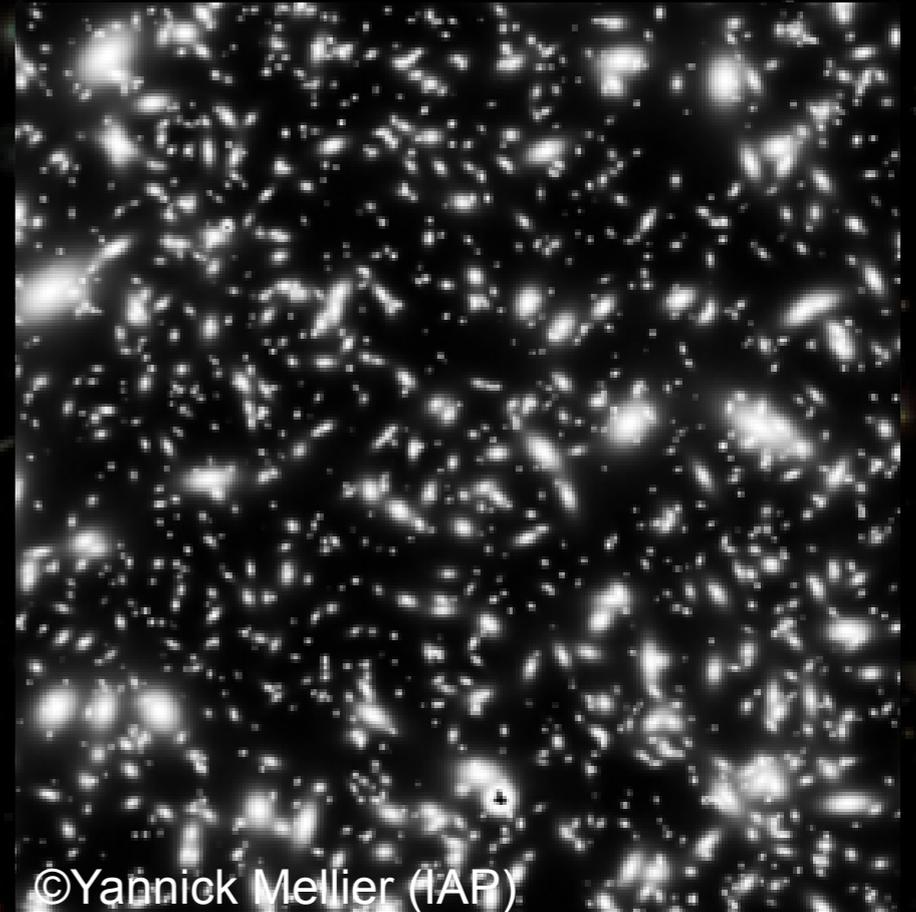
Halo de matière noire

- 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



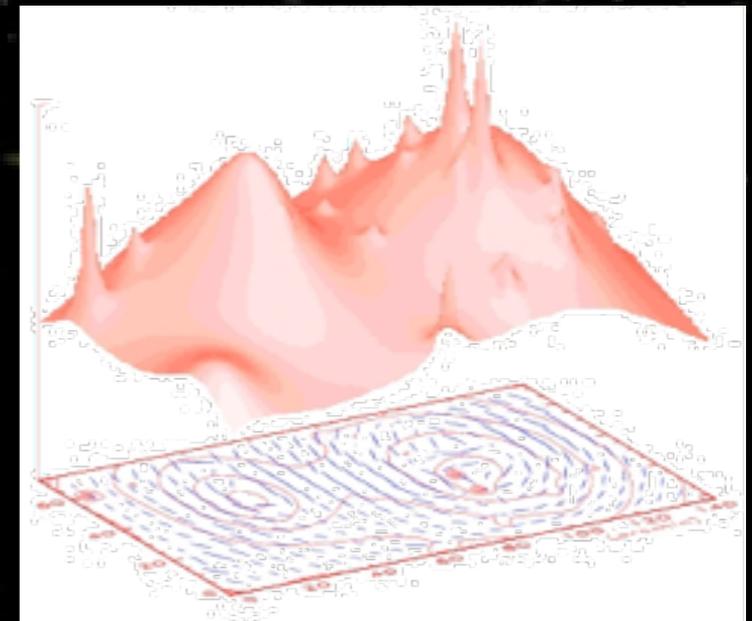
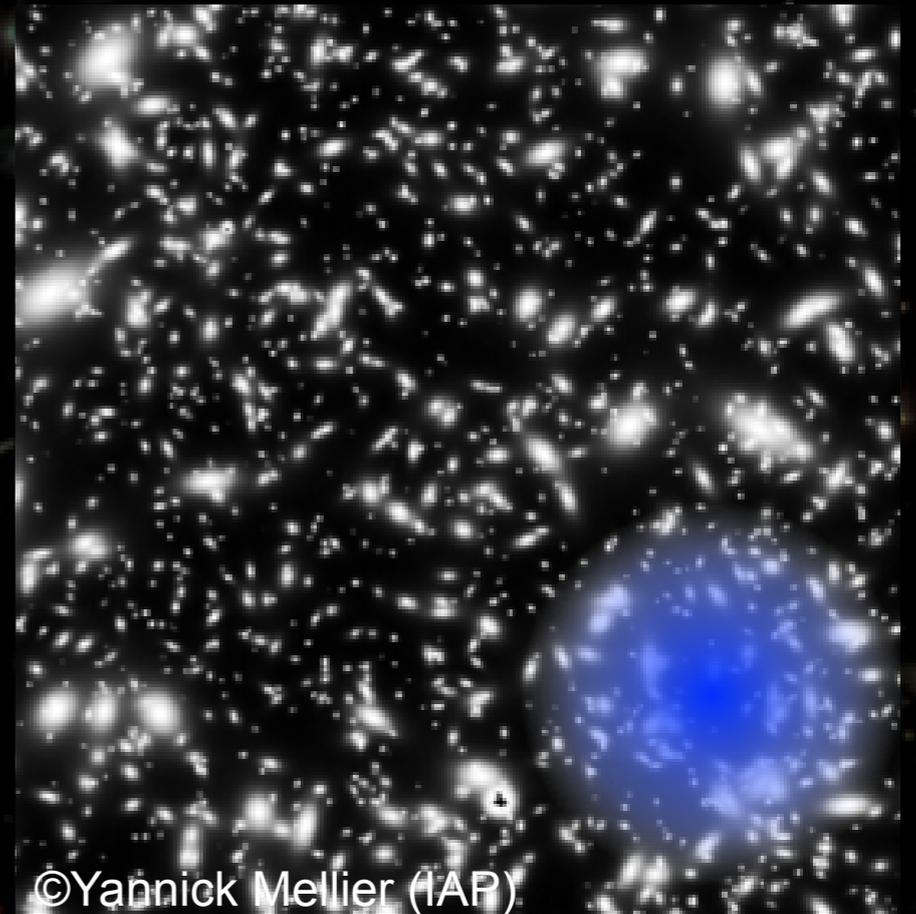
Lentillage gravitationnel

- 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



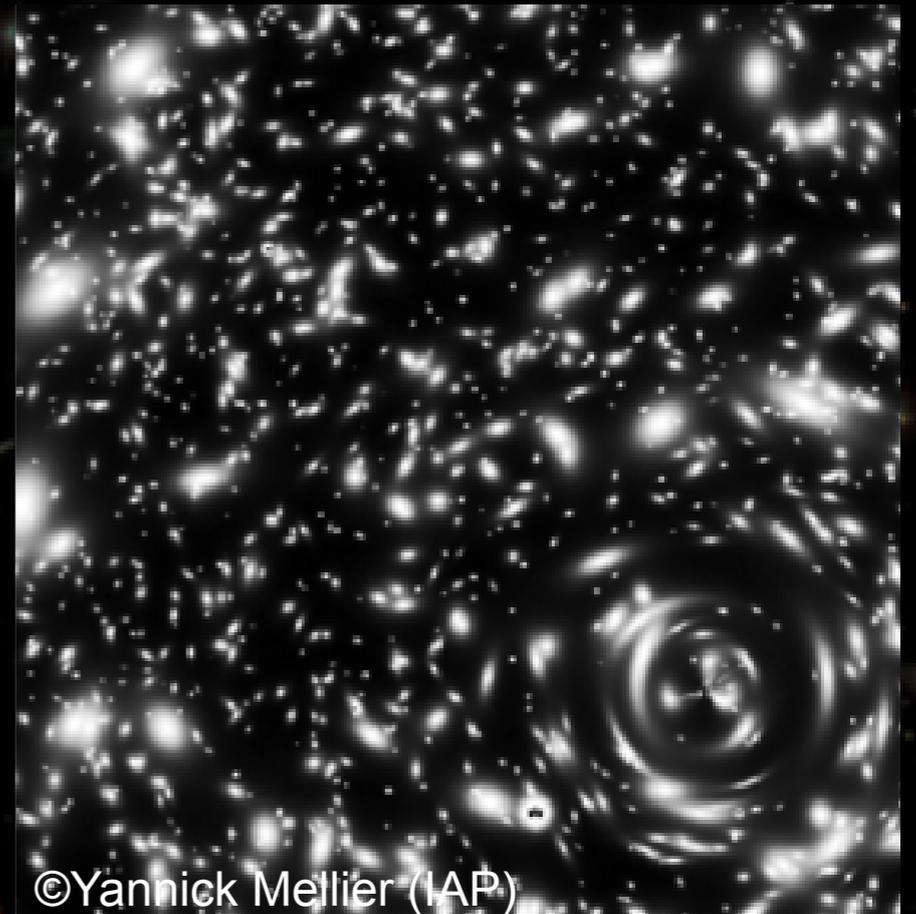
Lentillage gravitationnel

- 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

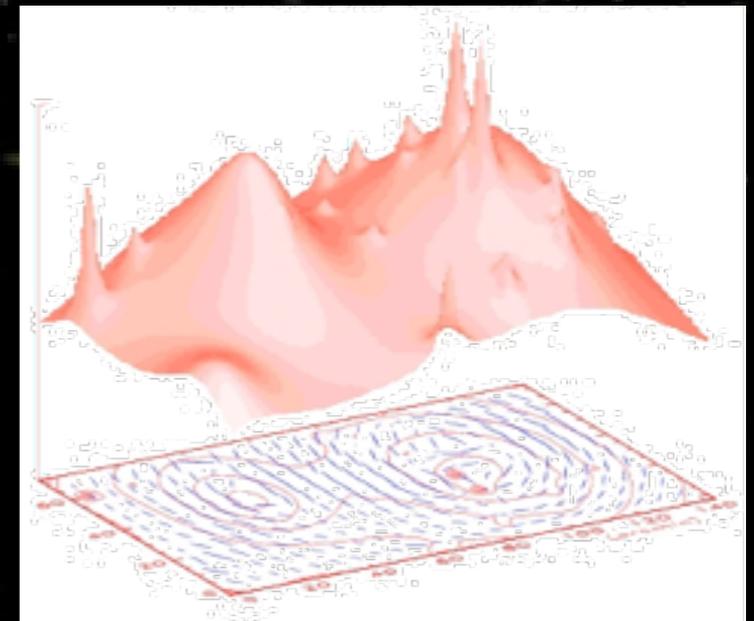
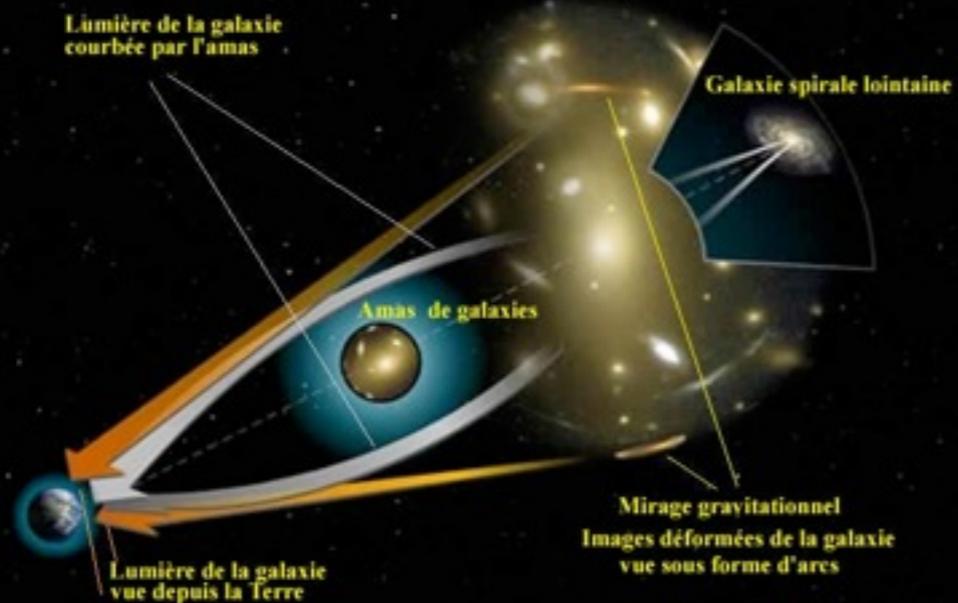


Lentillage gravitationnel

- 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)



Reconstruction du potentiel gravitationnel

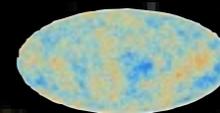
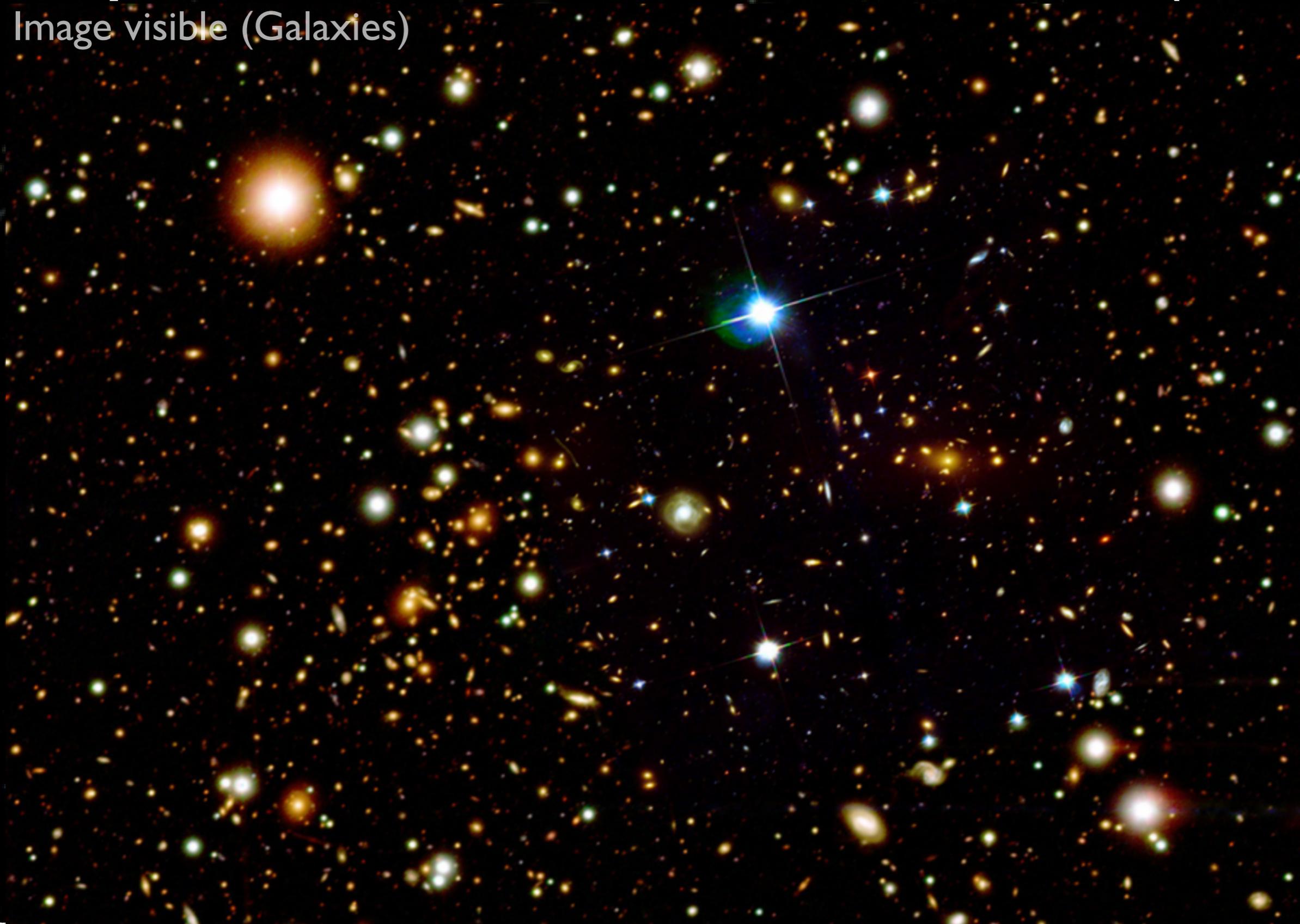
Mauve : masse noire reconstruite
par lentillage faible



Résultat : matière noire systématiquement majoritaire !

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)

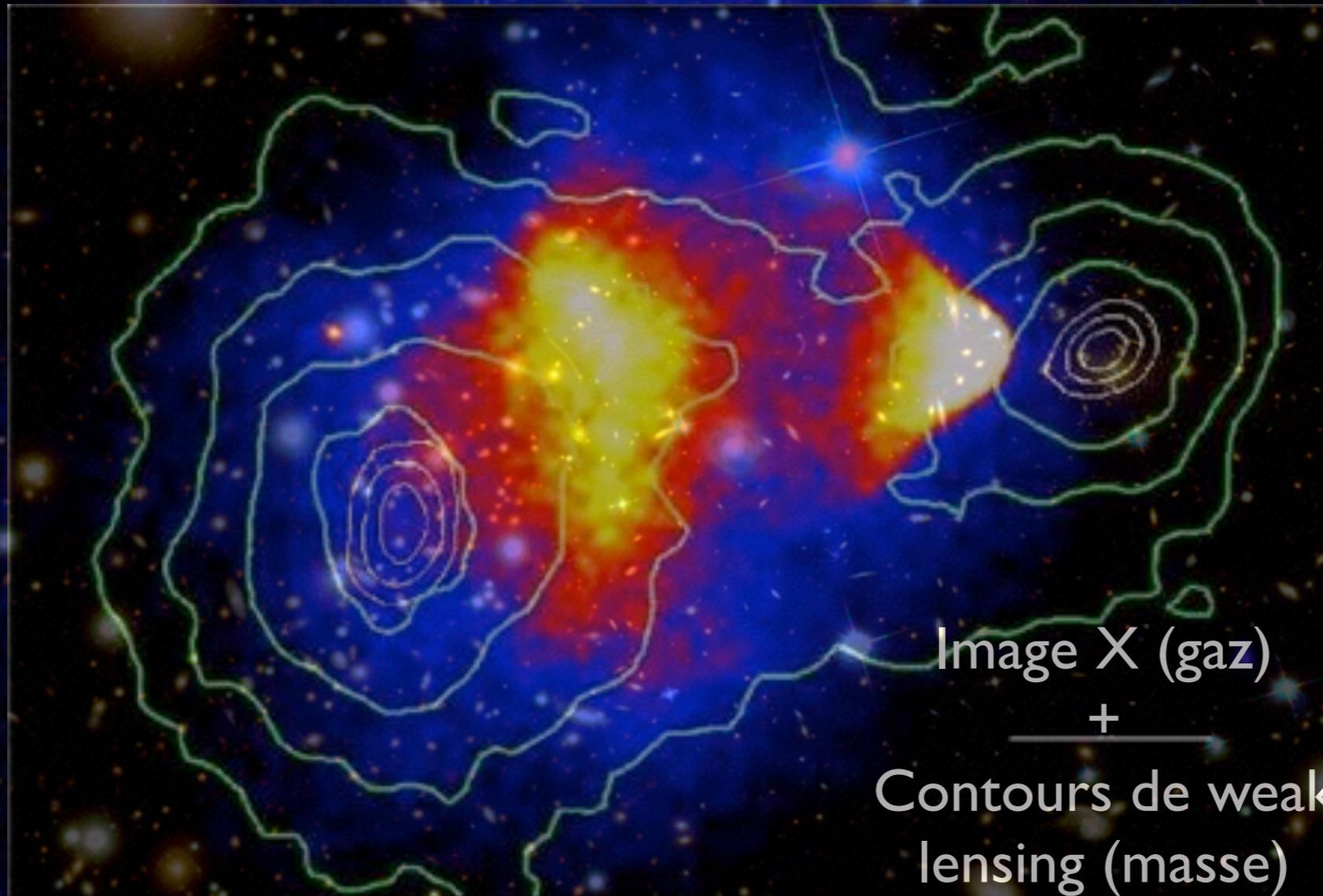


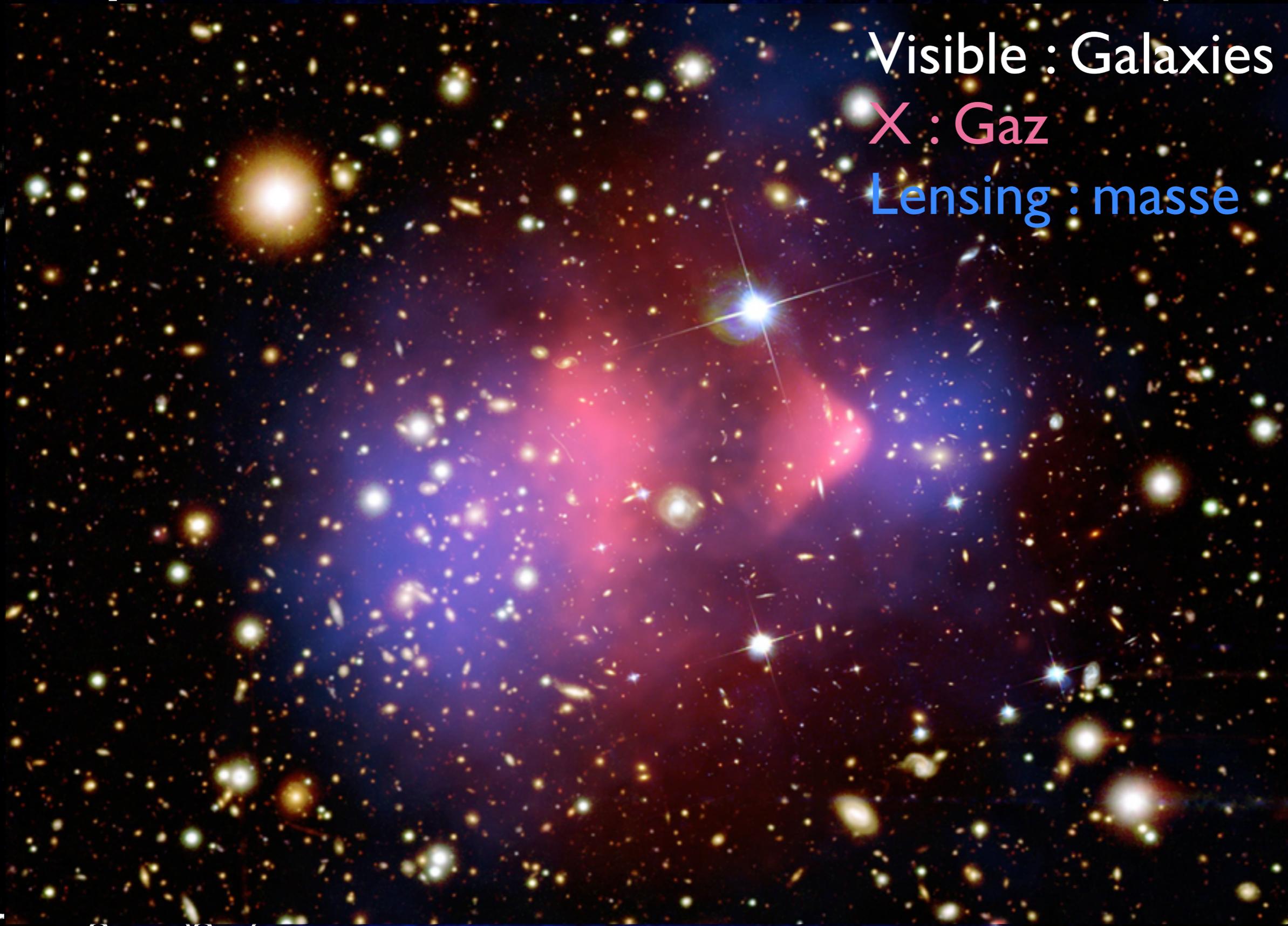
Image X (gaz) - Chandra

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

Visible : Galaxies

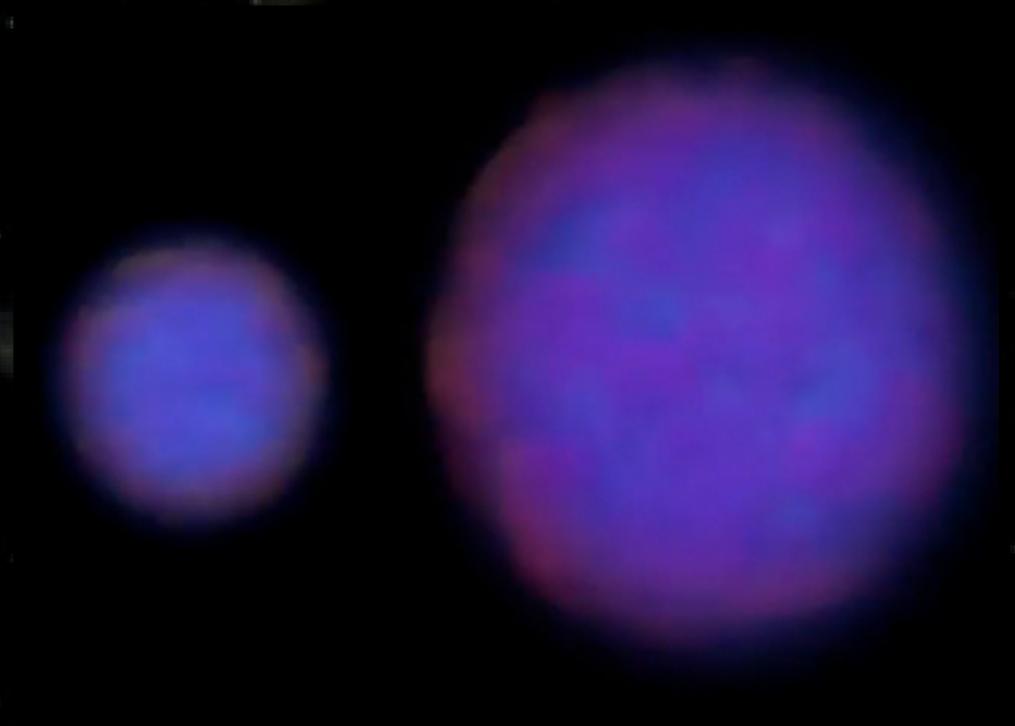
X : Gaz

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 un argument fort en faveur de la matière noire

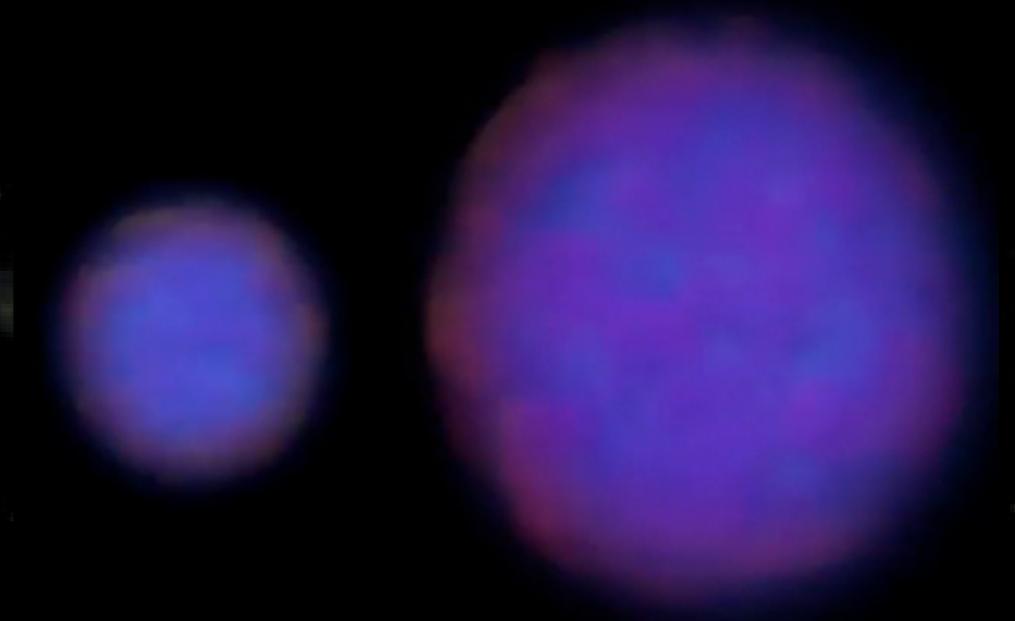


Simulation Chandra



«Bullet Cluster»

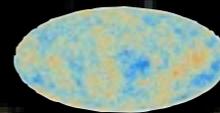
- collision de deux amas
- Les galaxies et la matière noire sont non collisionnelles
 - ★ Elles passent «sans se voir»
- Le gaz est collisionnel
 - ★ Il reste au centre, s'échauffe et des ondes de choc apparaissent
- C'est un argument fort en faveur de la matière noire



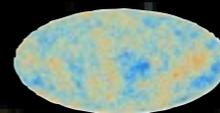
Simulation Chandra



SDSS: Sloan Digital Sky Survey



SDSS: Sloan Digital Sky Survey

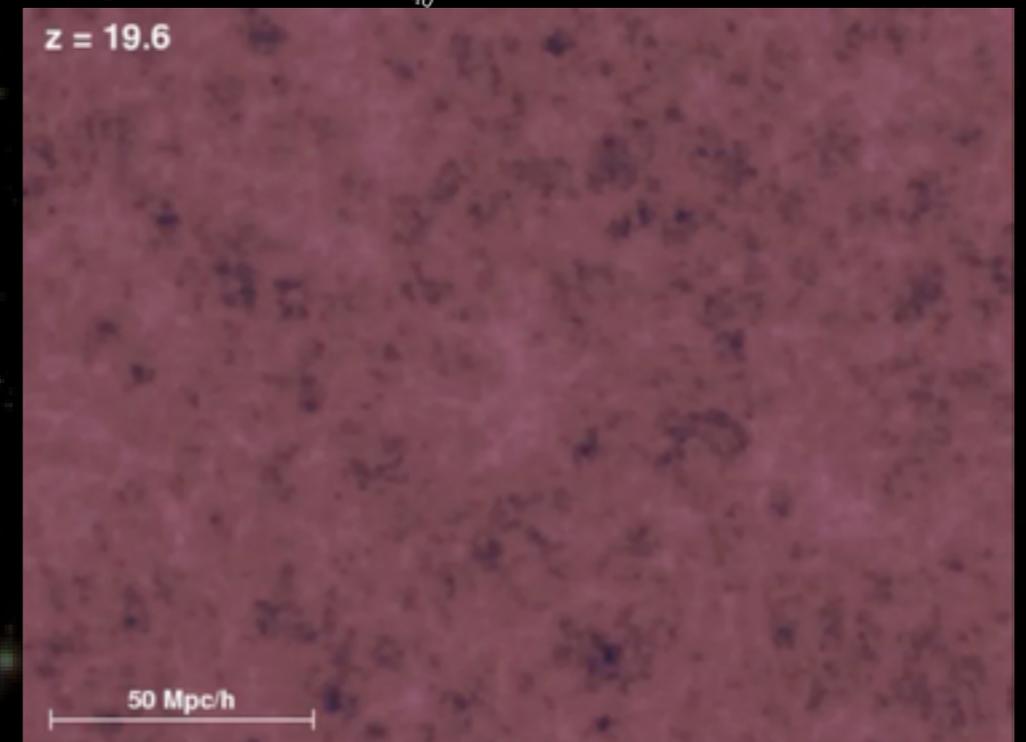
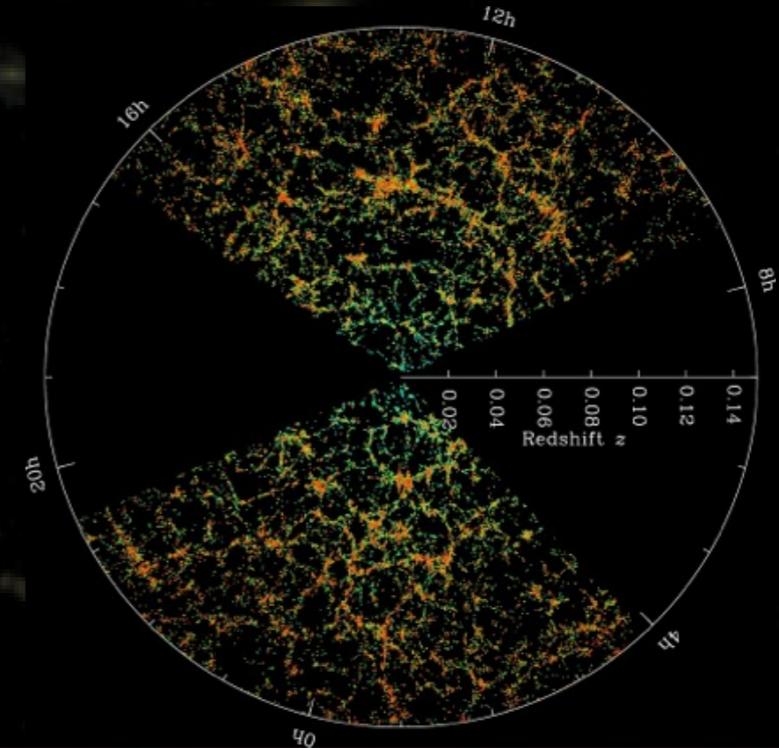


Matière noire et grandes structures

- Univers aux grandes échelles

- ★ Une sorte de structure en éponge
- ★ Semble homogène aux très grandes échelles
- ★ On arrive très bien à reproduire cette structure avec des simulations numériques
- ★ à condition de mettre majoritairement de la matière noire
- ★ décidément... on dirait qu'il y en a vraiment...

Galaxies dans une tranche en déclinaison de SDSS

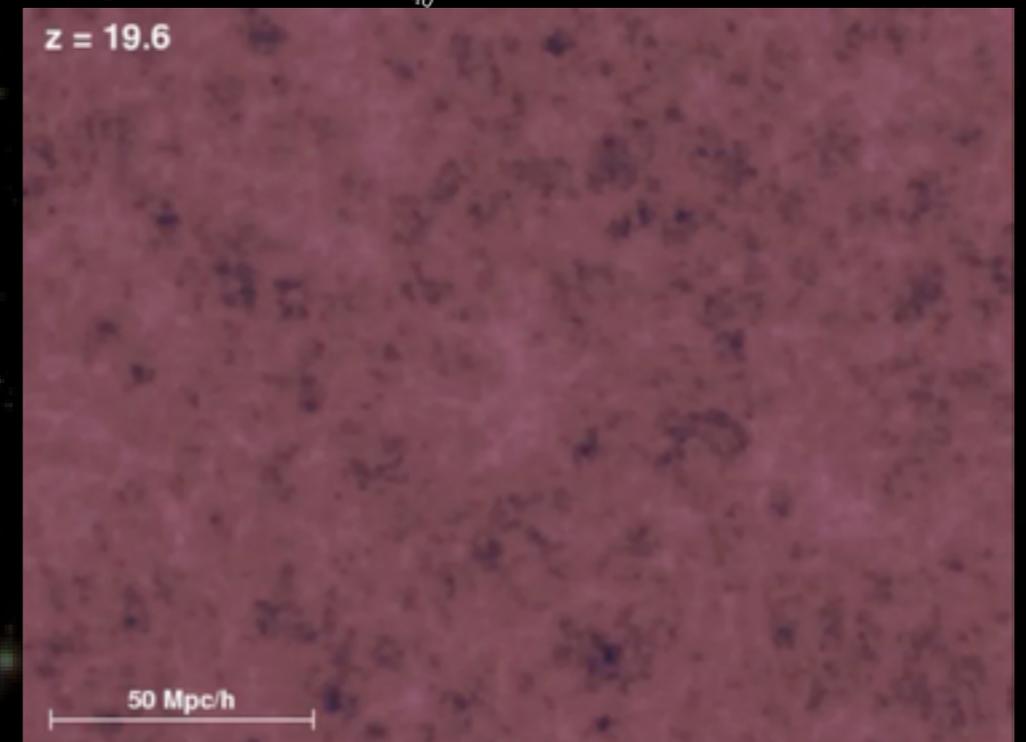
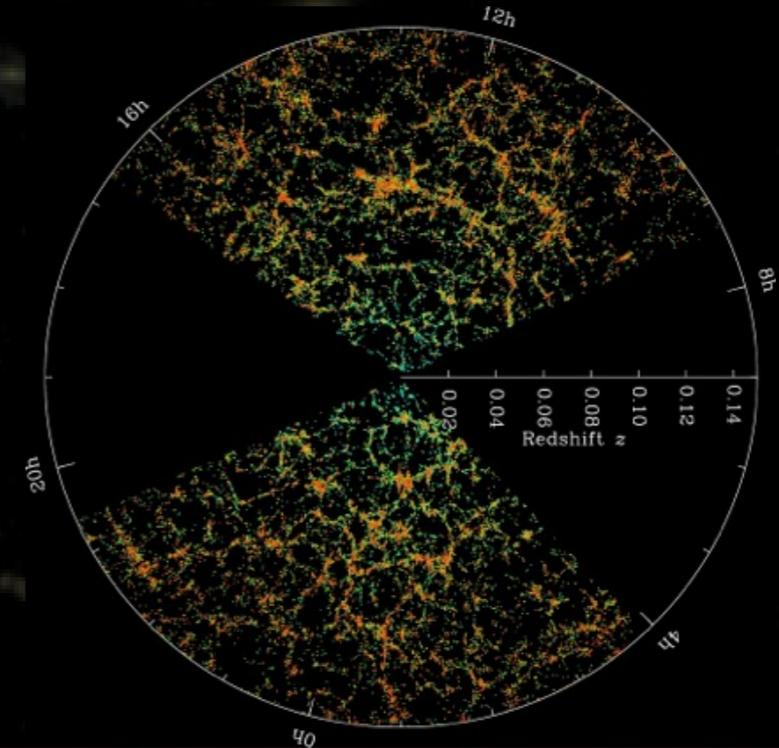


Matière noire et grandes structures

- Univers aux grandes échelles

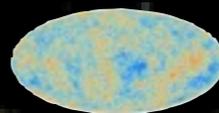
- ★ Une sorte de structure en éponge
- ★ Semble homogène aux très grandes échelles
- ★ On arrive très bien à reproduire cette structure avec des simulations numériques
- ★ à condition de mettre majoritairement de la matière noire
- ★ décidément... on dirait qu'il y en a vraiment...

Galaxies dans une tranche en déclinaison de SDSS



Énergie sombre : Λ

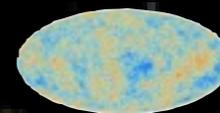
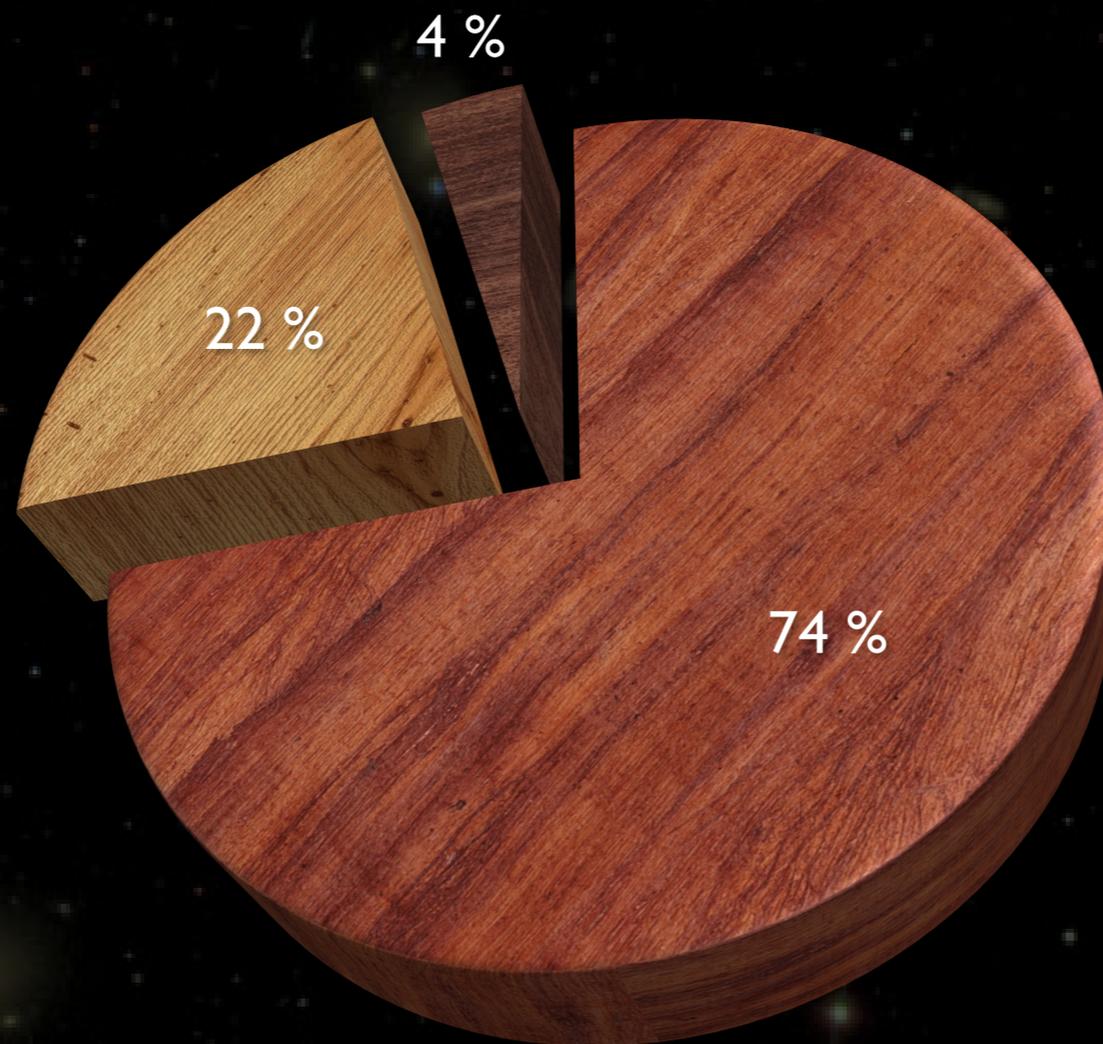
constante cosmologique ?



Énergie sombre : Λ

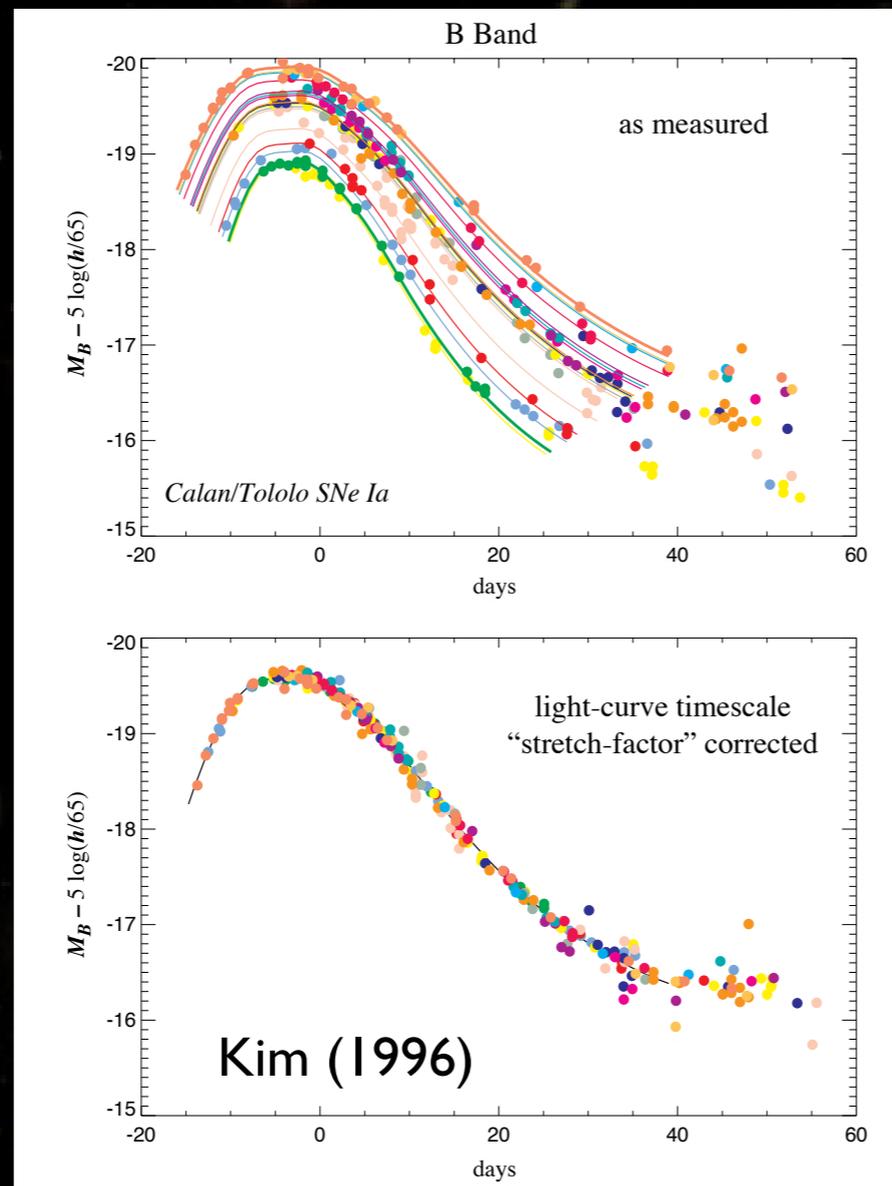
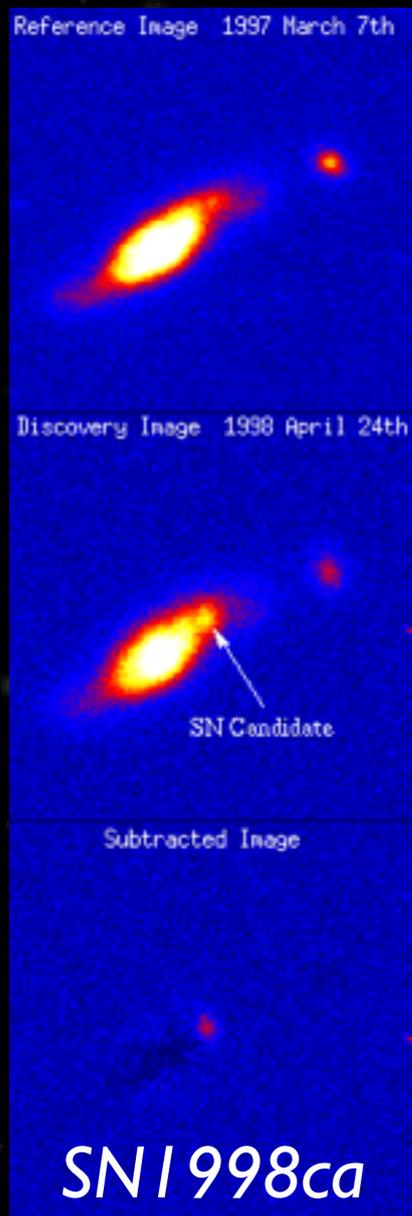
constante cosmologique ?

- Énergie sombre
- Matière noire
- Matière baryonique



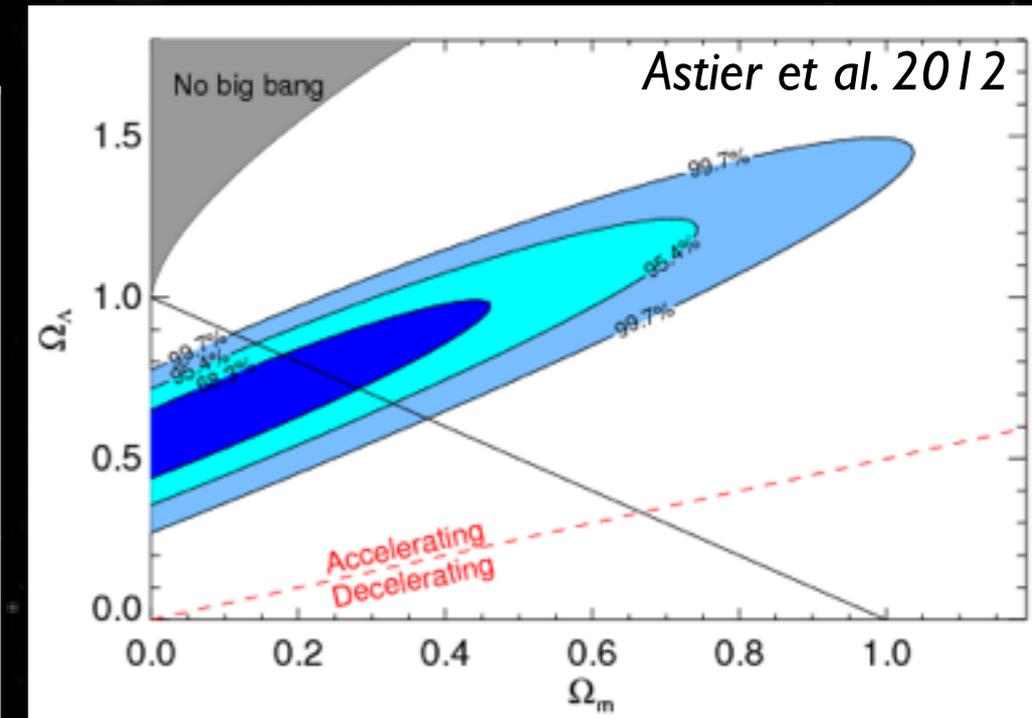
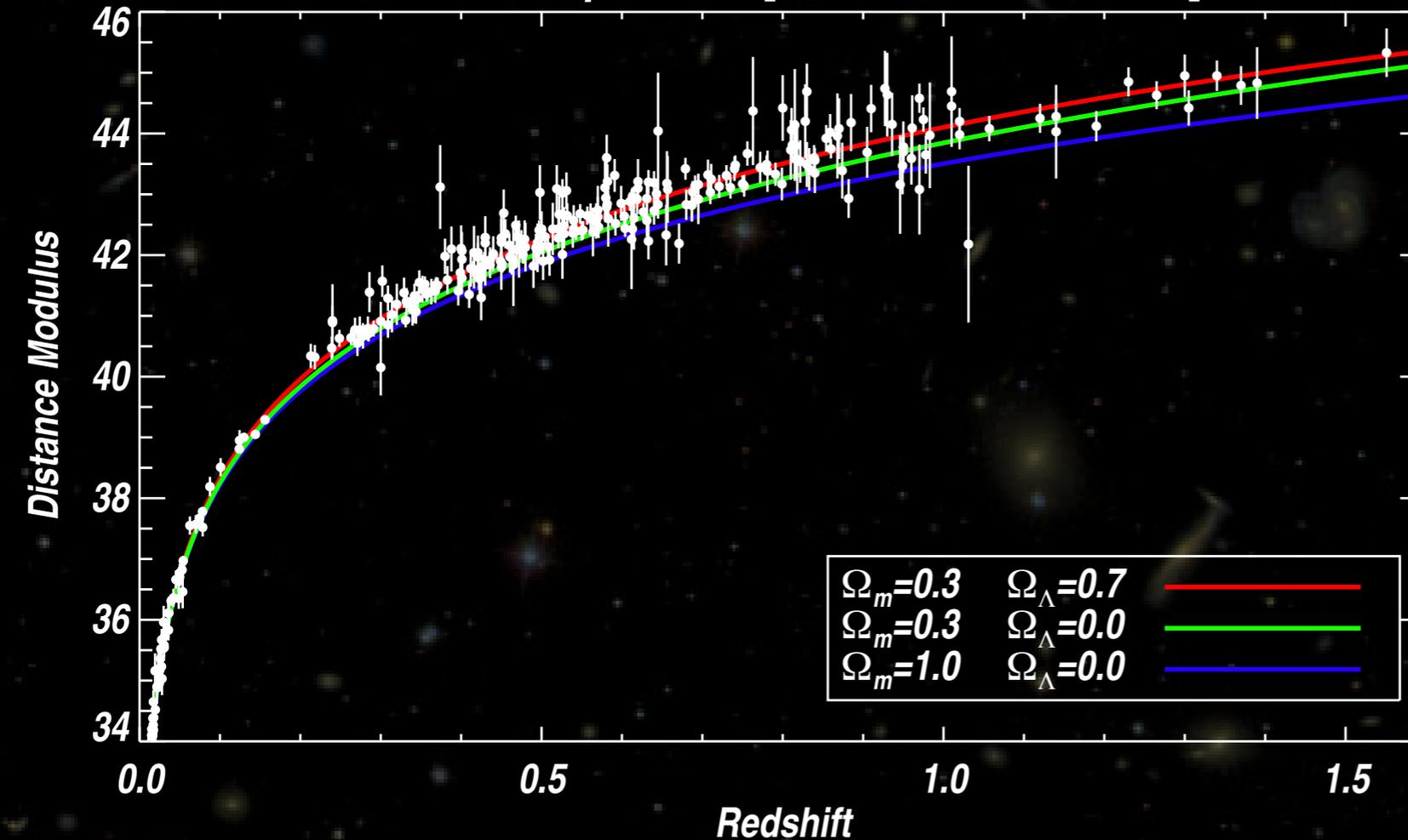
SN Ia : Chandelles standard

- Très lumineuses (plus que leur galaxie): visibles de loin
- Luminosité au maximum standardisable



«Découverte» de Λ : 1998

Union Sample from [Kowalski et al., 2008]

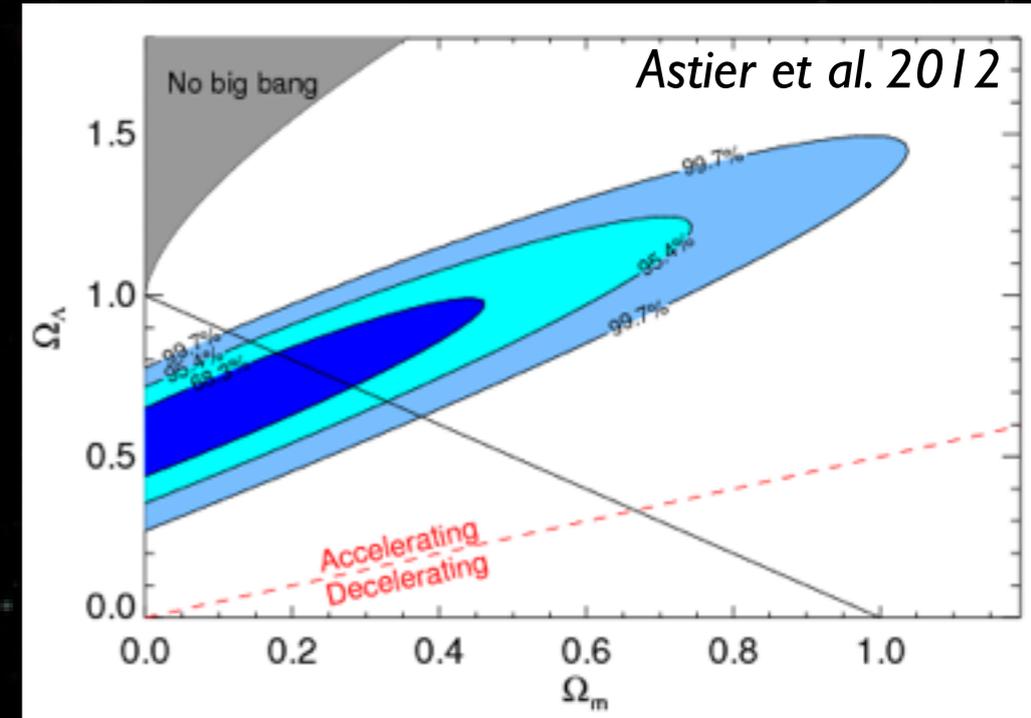
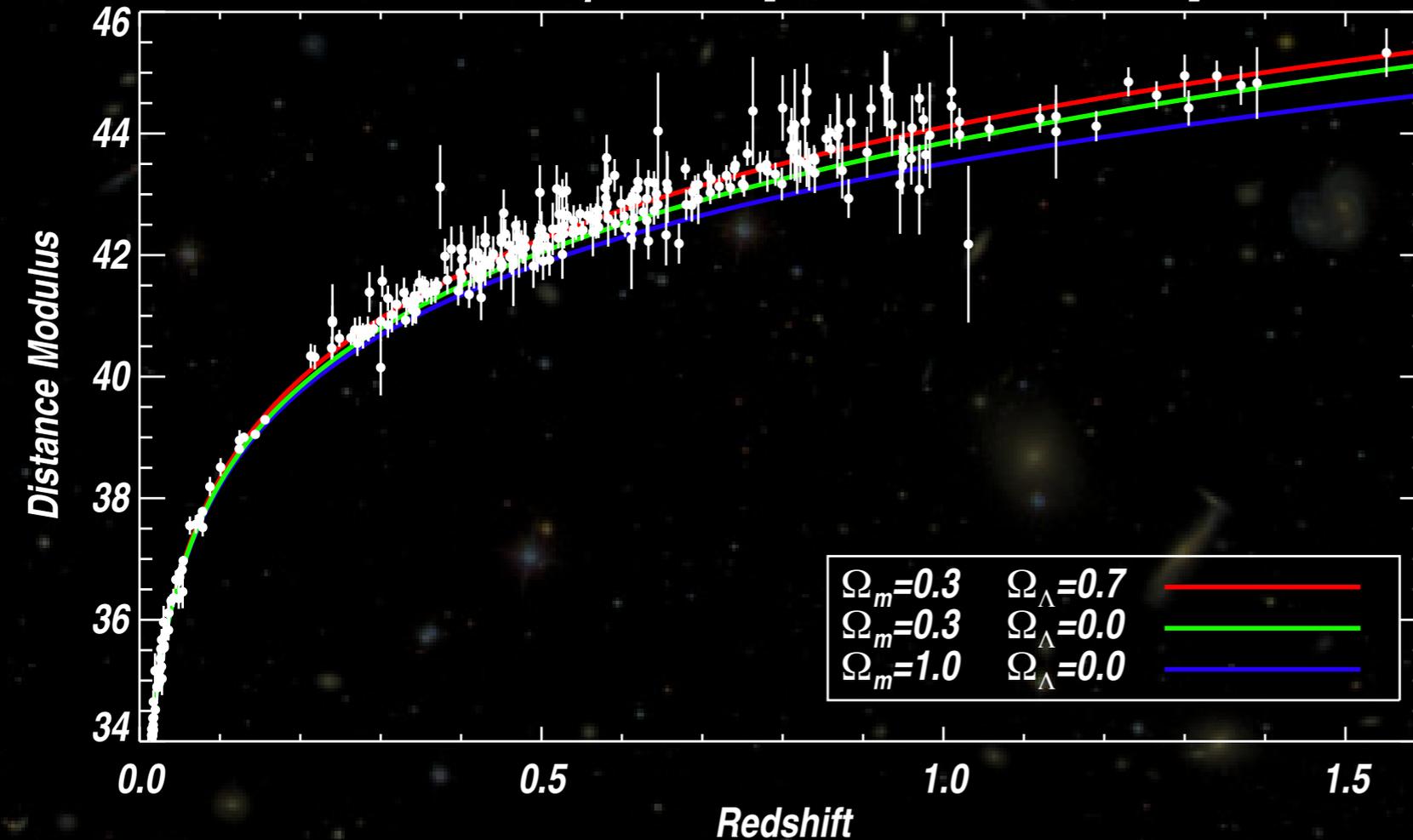


L'Univers est en expansion accélérée !

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

«Découverte» de Λ : 1998

Union Sample from [Kowalski et al., 2008]

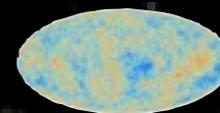


L'Univers est en expansion accélérée !

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

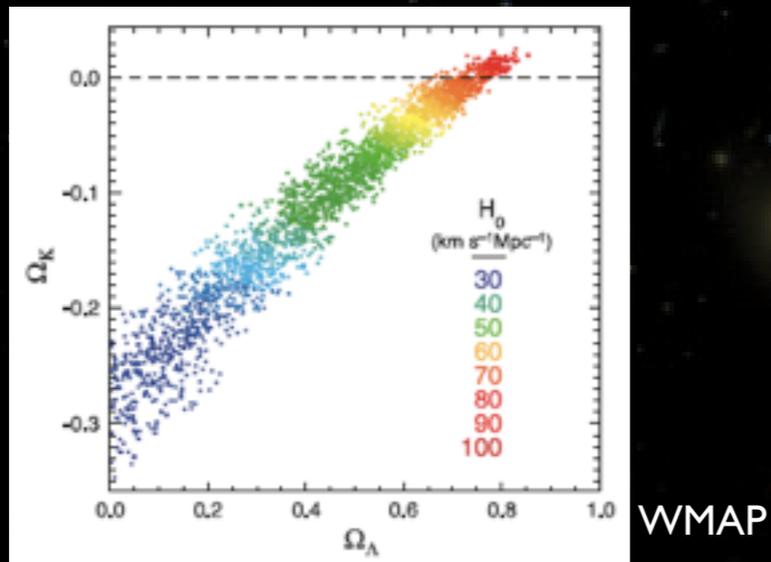


Prix Nobel 2011

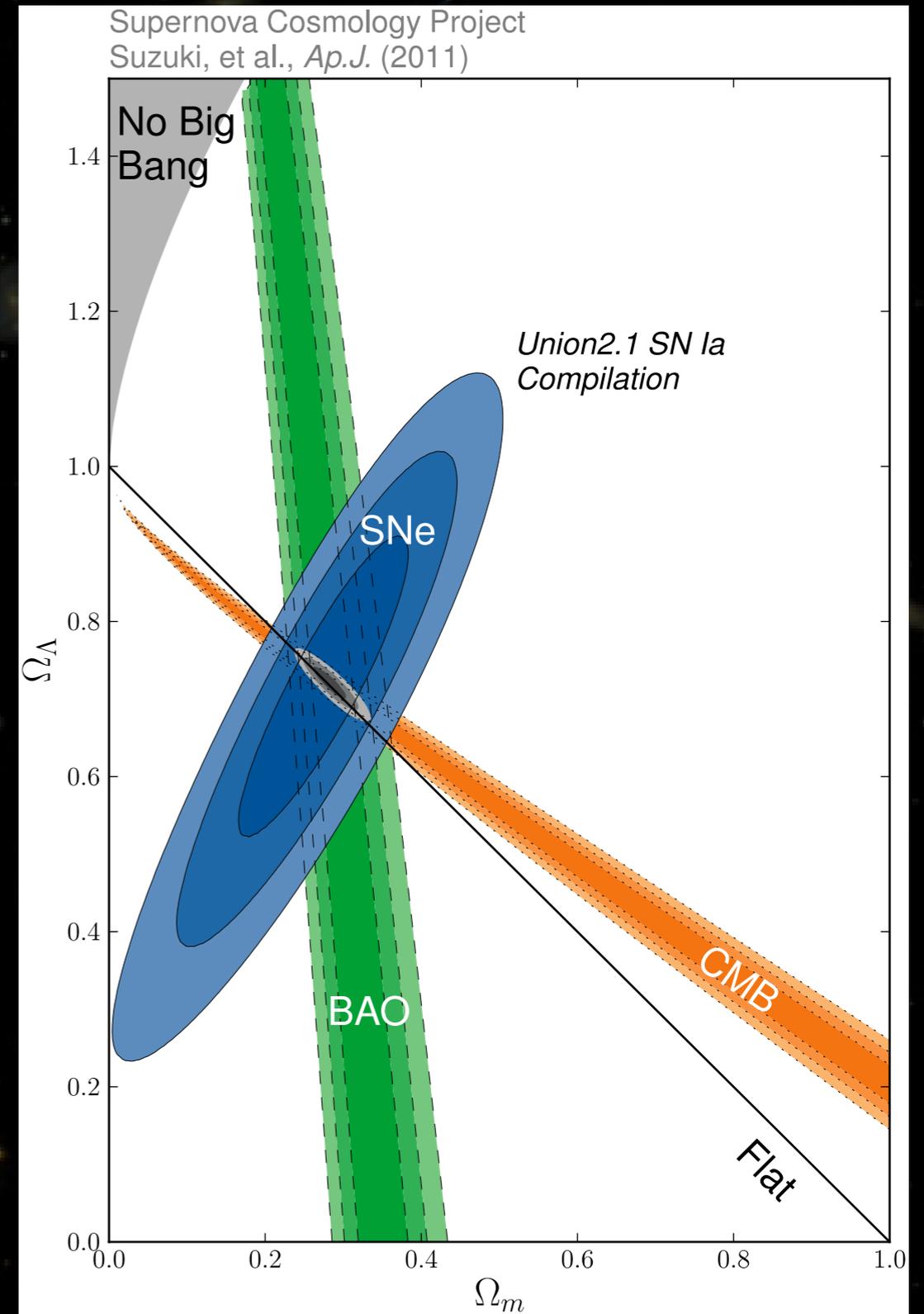


Preuves expérimentales de Λ

- Trois méthodes indépendantes
- Convergence remarquable
 - ★ $\Omega_m=0.3$ $\Omega_\Lambda=0.7$



- Λ CDM est incontournable
 - ★ Bug théorique ? observationnel ?
 - ★ Énergie noire ?
 - ★ Gravitation ?

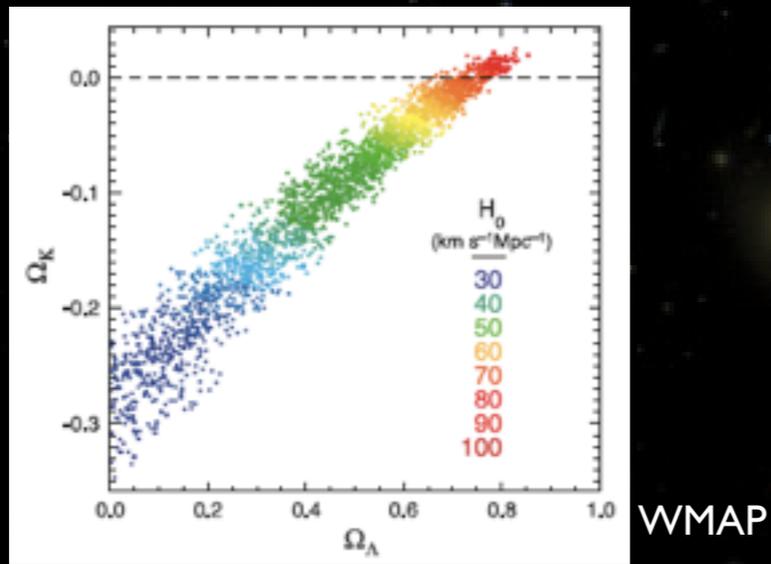


Preuves expérimentales de Λ

- Trois méthodes indépendantes

- Convergence remarquable

★ $\Omega_m=0.3$ $\Omega_\Lambda=0.7$



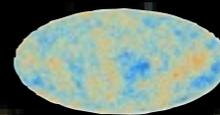
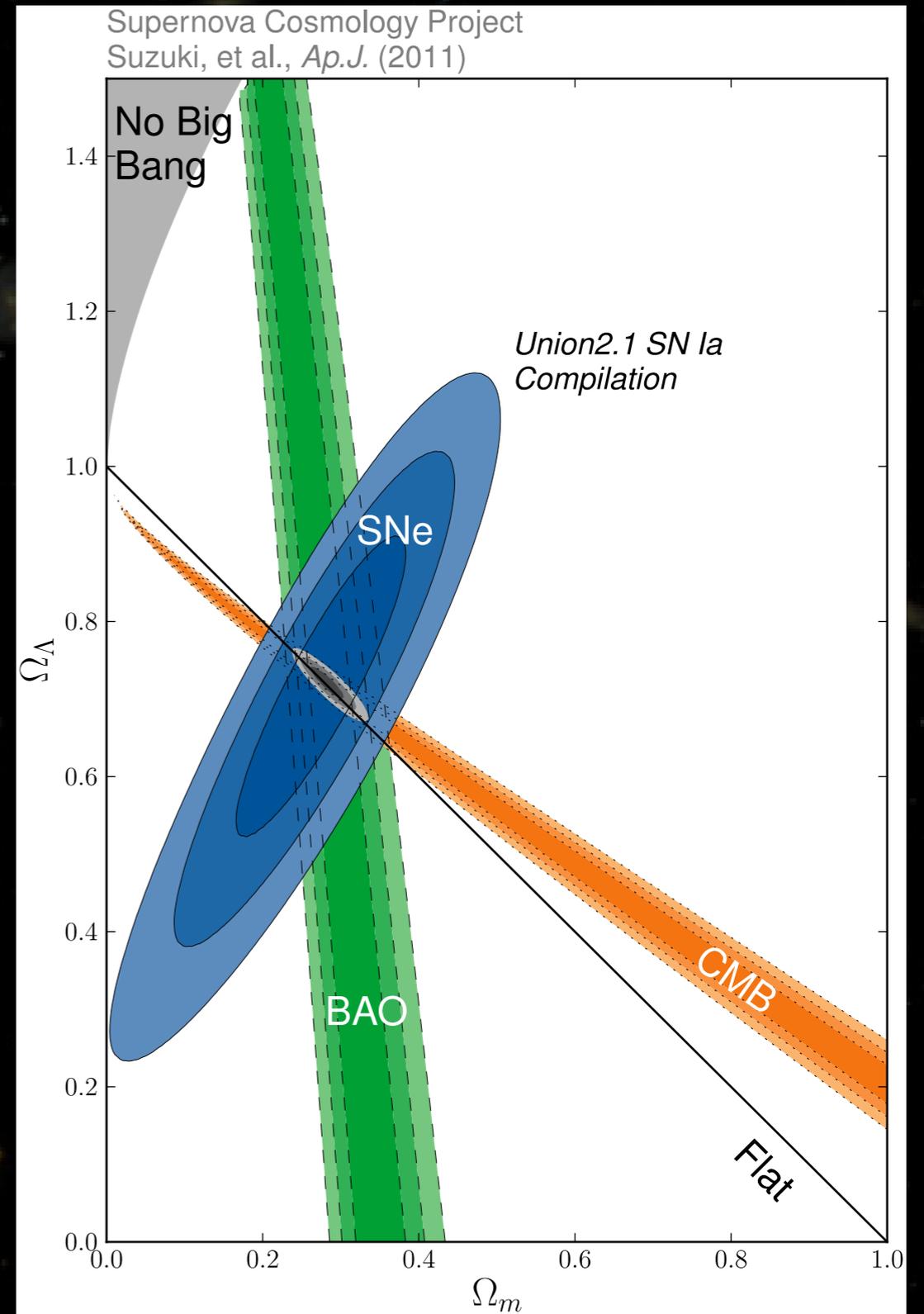
- Λ CDM est incontournable

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

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

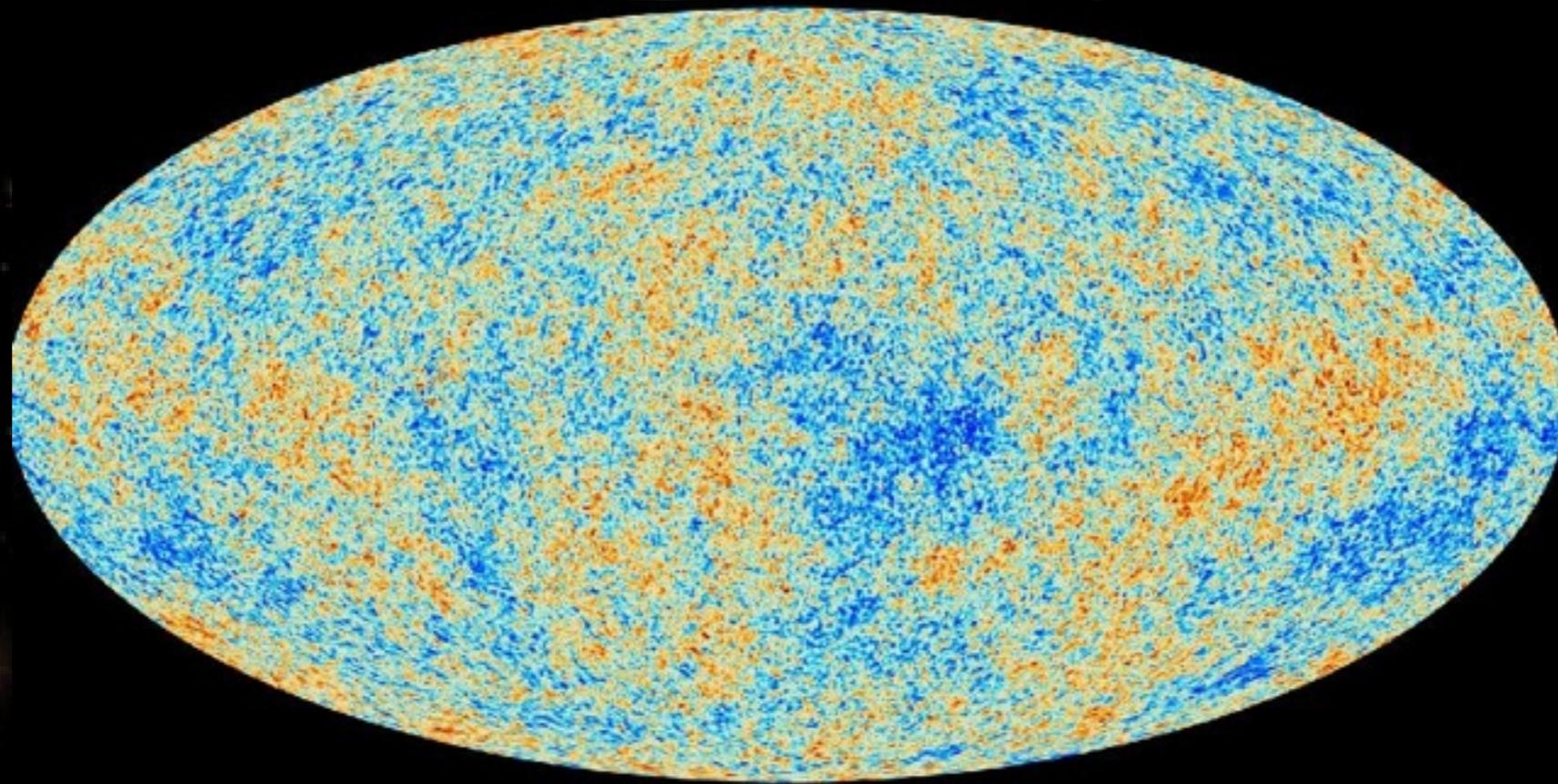
Espace-temps

Contenu matériel



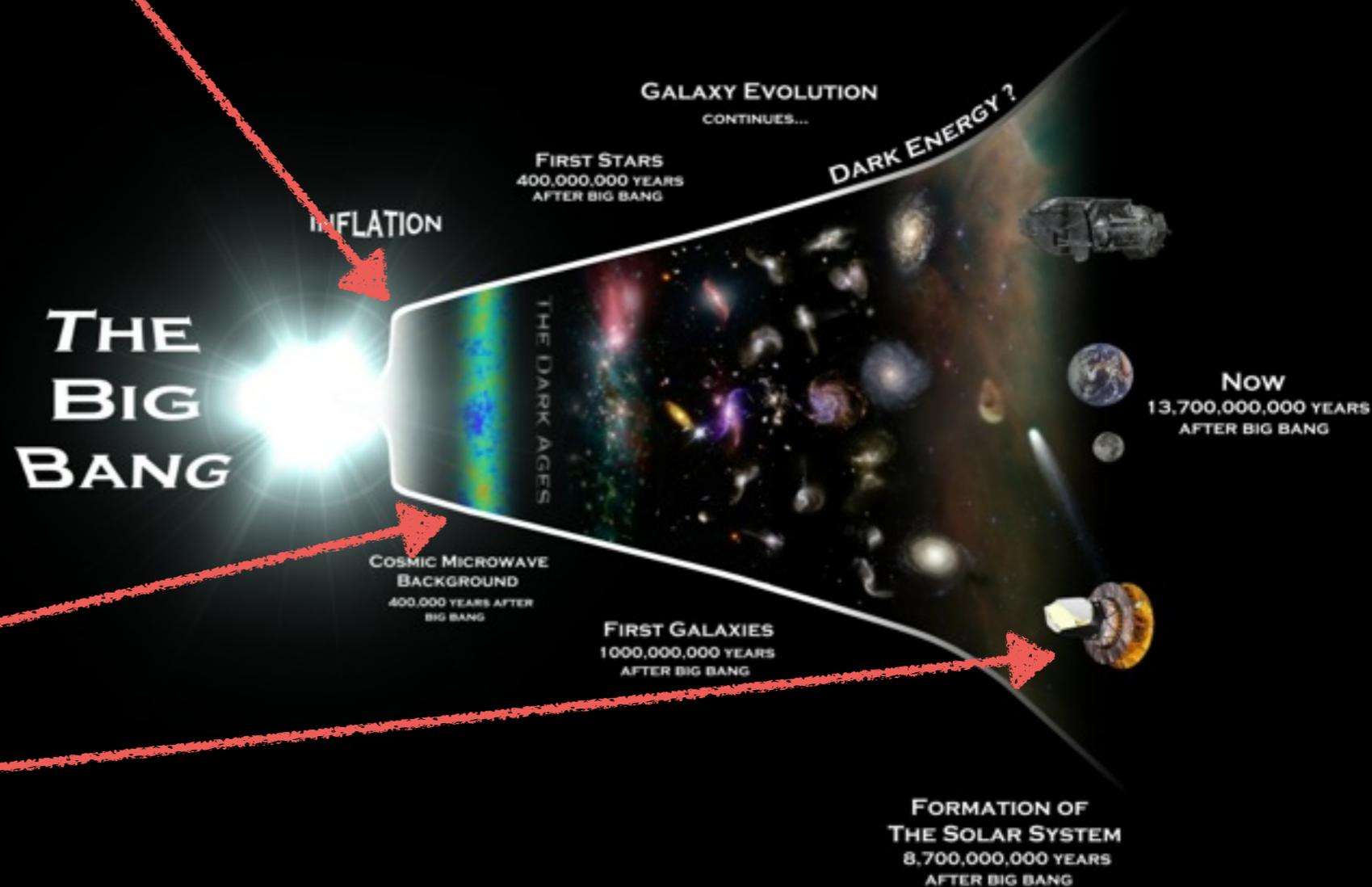
Le fond diffus cosmologique

alias « Rayonnement à 3K » ou CMB pour les intimes



Histoire de l'Univers (en résumé)

- Univers jeune:
- 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



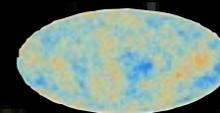
Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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



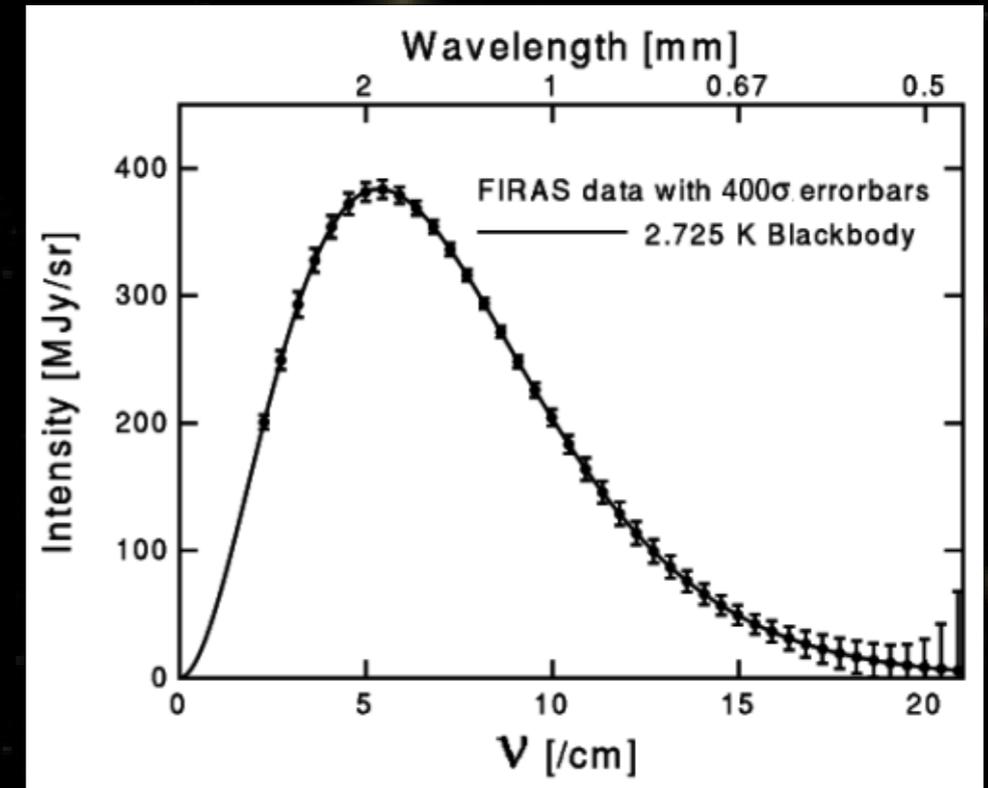
- Prix Nobel :

- ★ 1978 : Penzias & Wilson
- ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE



Le fond diffus cosmologique (CMB)

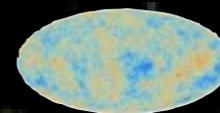
- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales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



(COBE/DMR homepage)

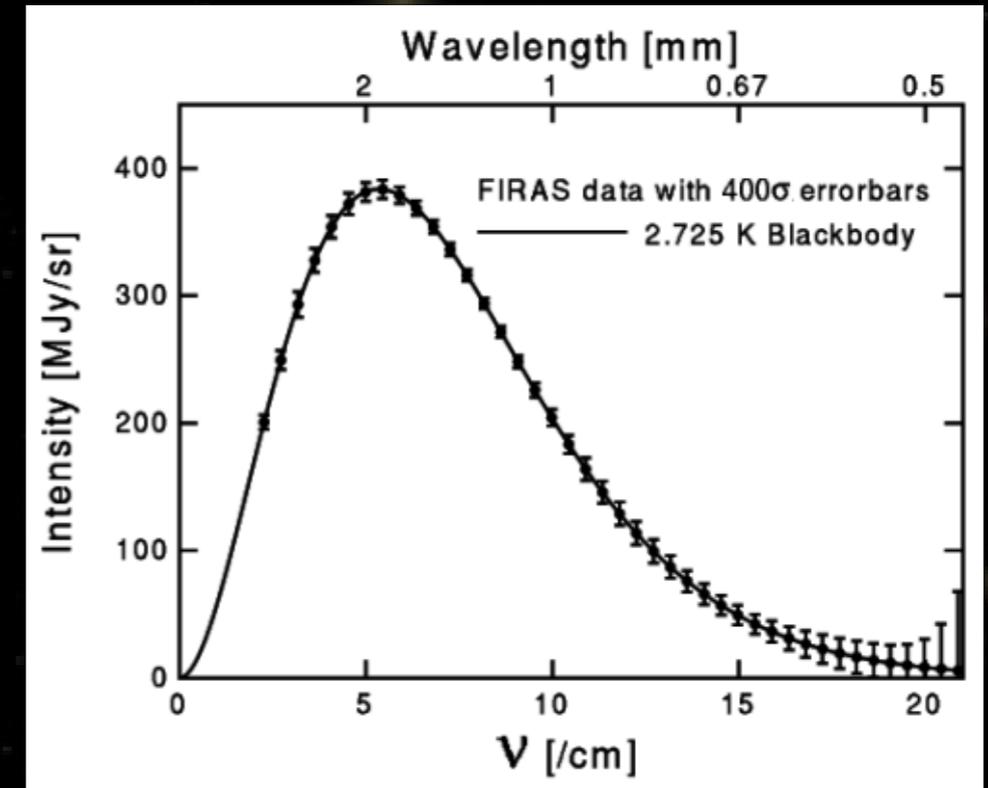
- Prix Nobel :

- ★ 1978 : Penzias & Wilson
- ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

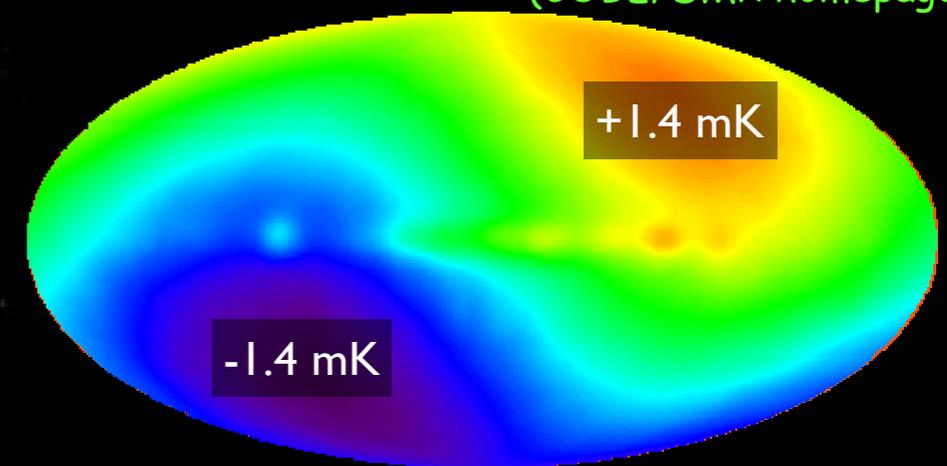


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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



(COBE/DMR homepage)



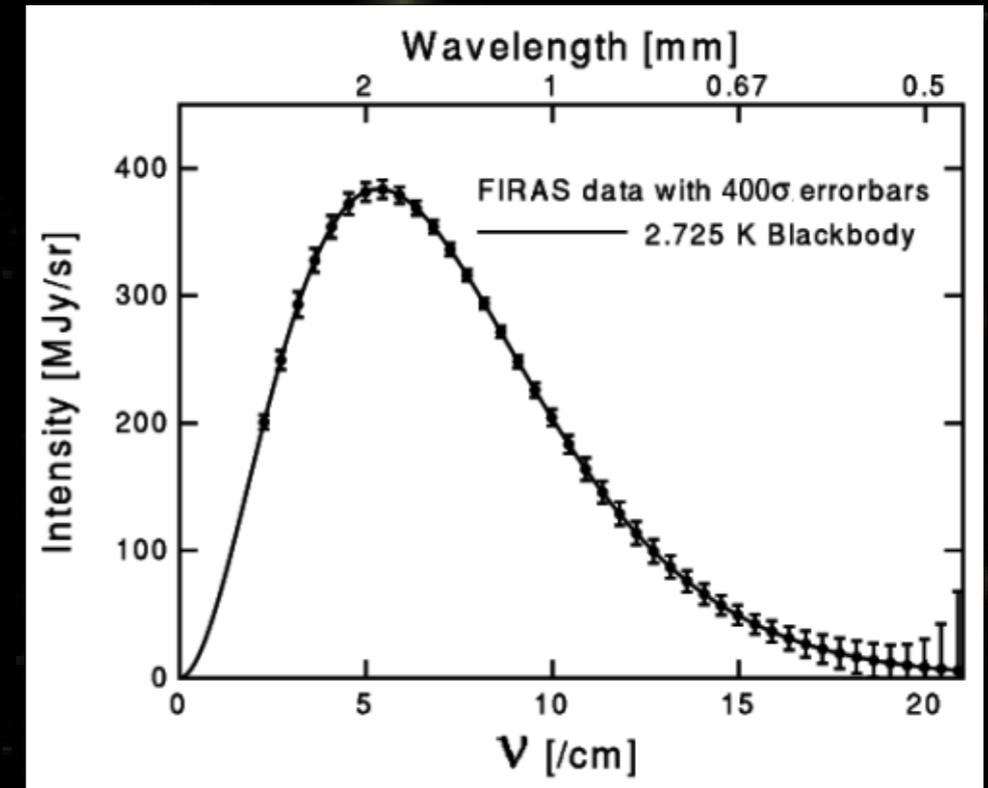
● Prix Nobel :

- ★ 1978 : Penzias & Wilson
- ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

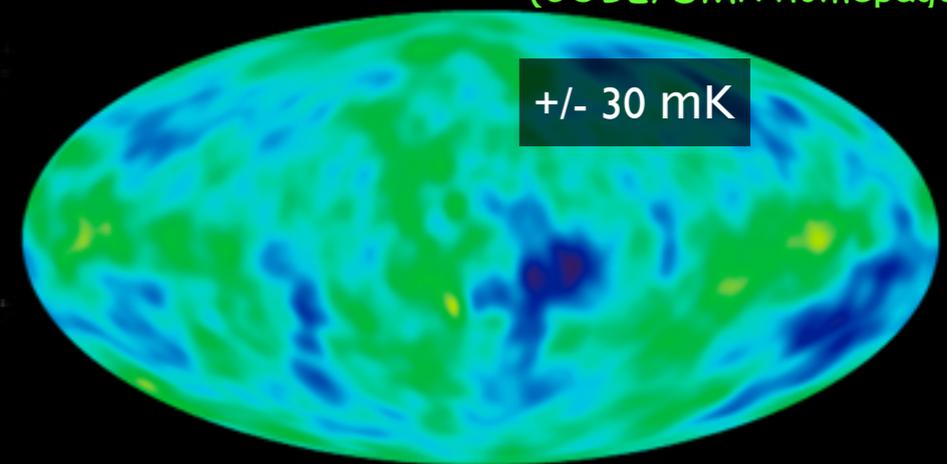


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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

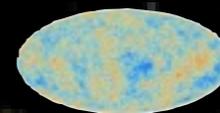


(COBE/DMR homepage)



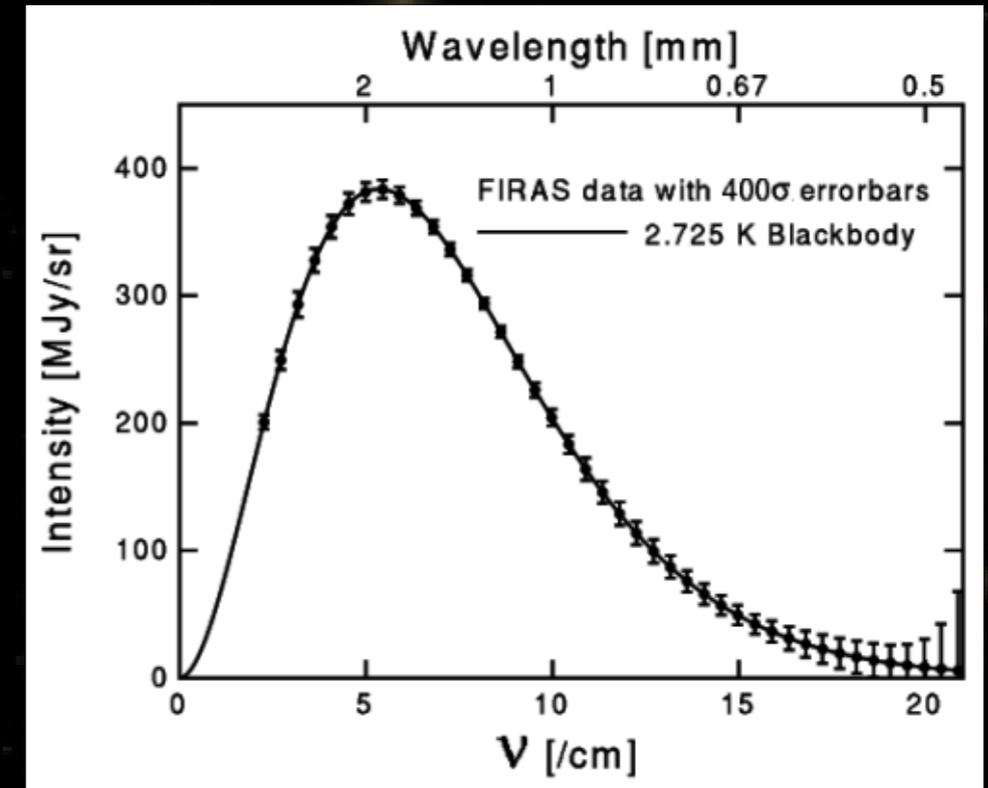
● Prix Nobel :

- ★ 1978 : Penzias & Wilson
- ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

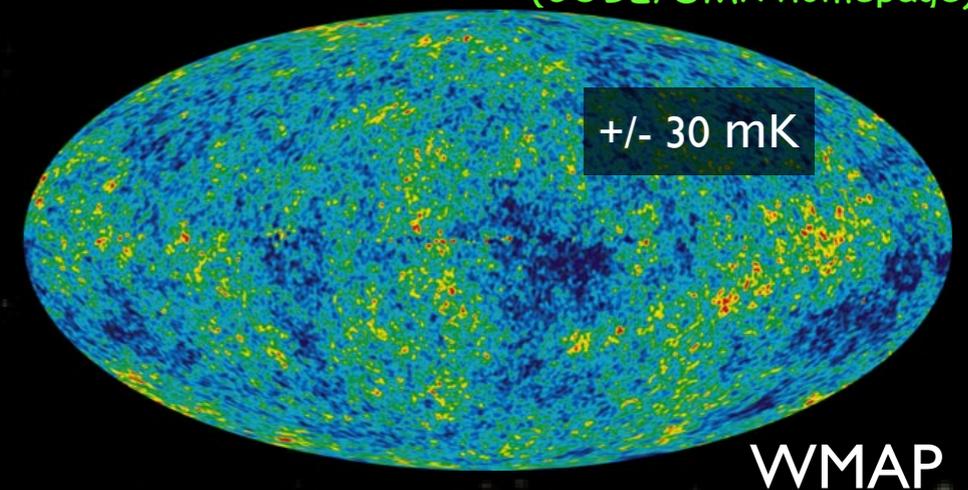


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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

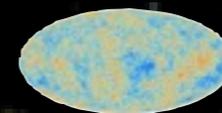


(COBE/DMR homepage)



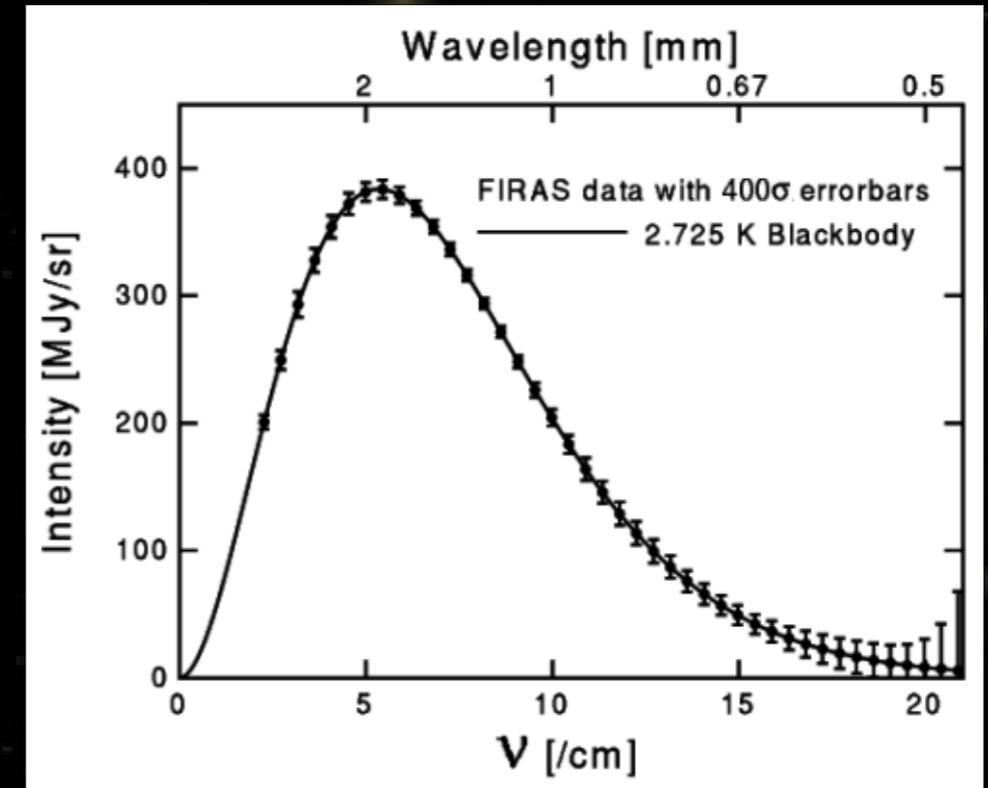
● Prix Nobel :

- ★ 1978 : Penzias & Wilson
- ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

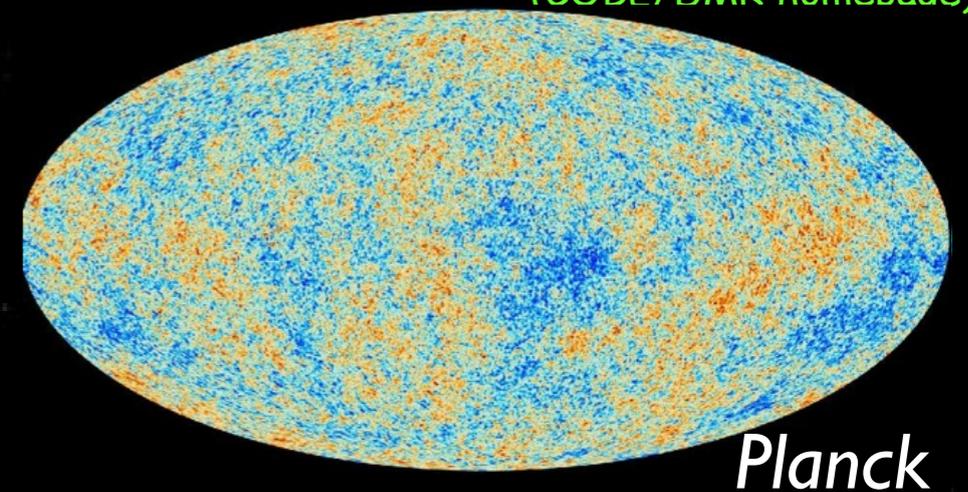


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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

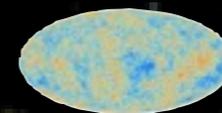


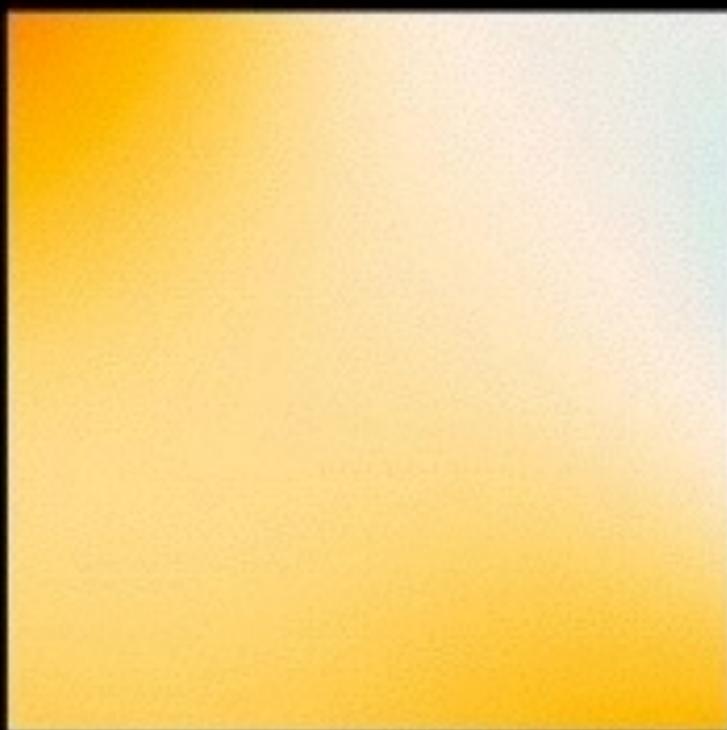
(COBE/DMR homepage)



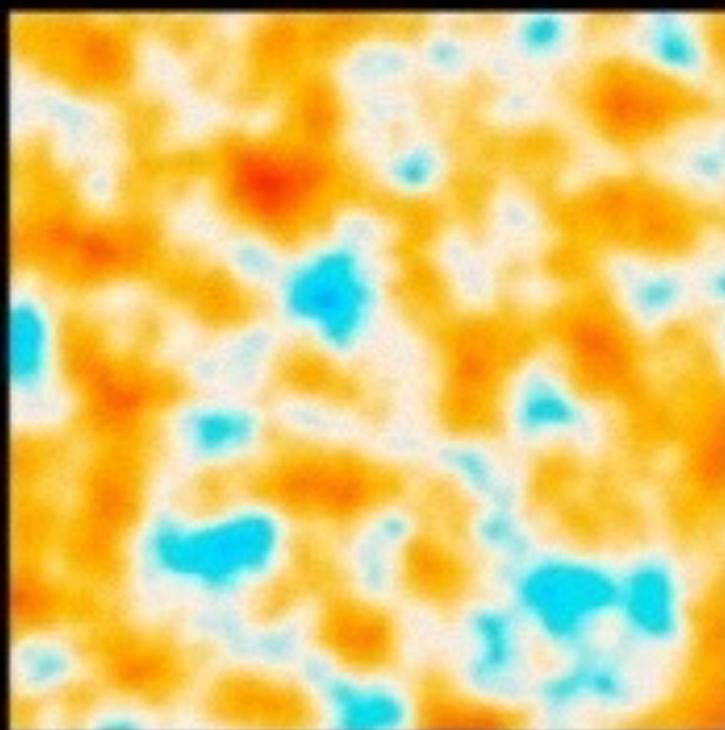
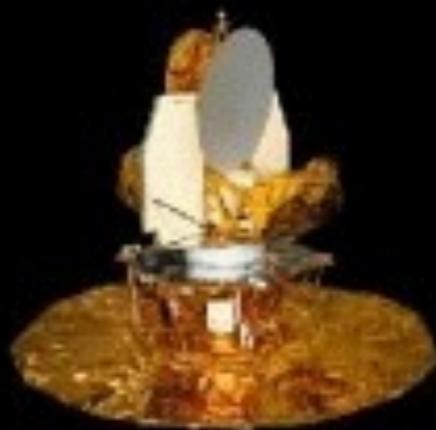
● Prix Nobel :

- ★ 1978 : Penzias & Wilson
- ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

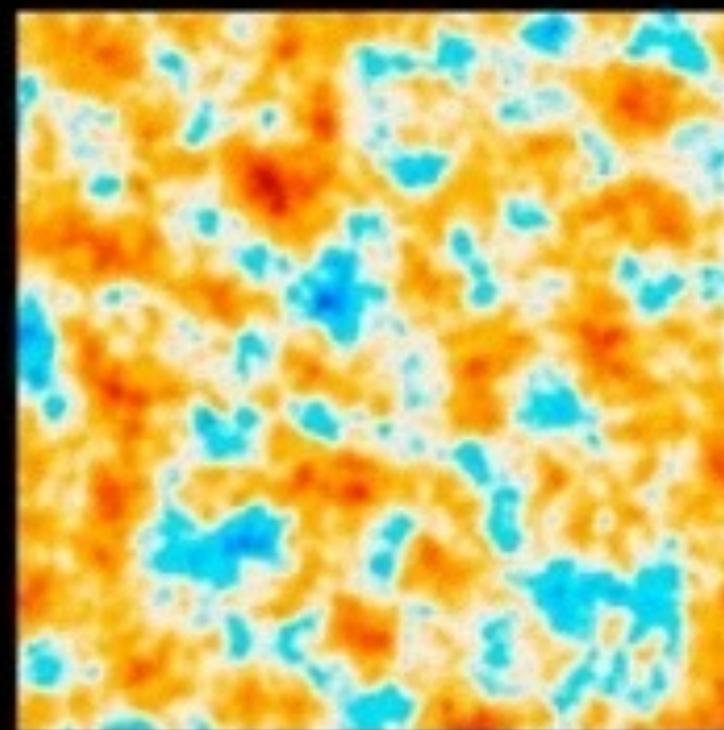




COBE
(NASA)



WMAP
(NASA)



Planck
(ESA)

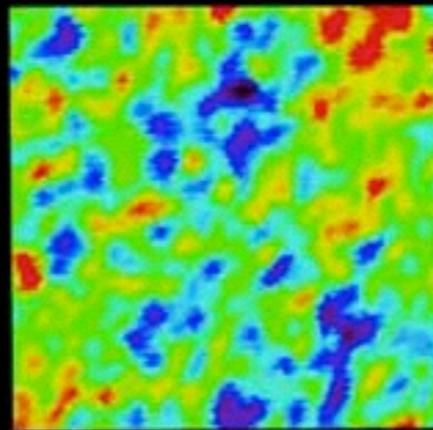
Influence de la géométrie de l'Univers

Horizon sonore
au découplage

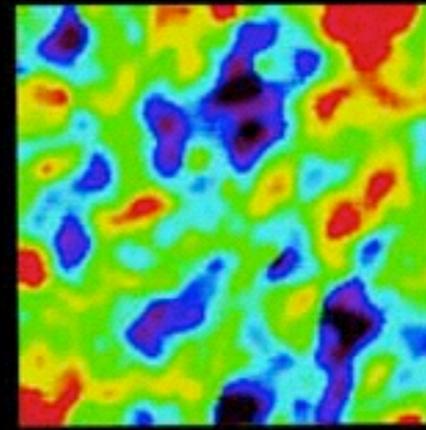
Ouvert

Fermé

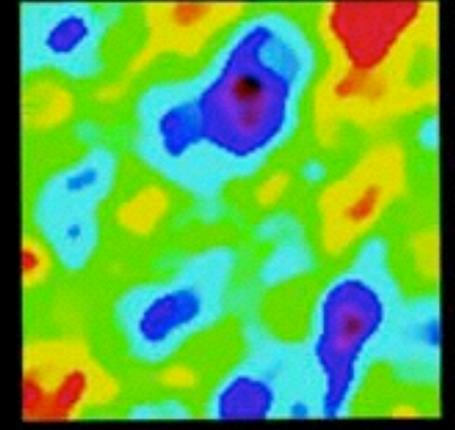
Plat



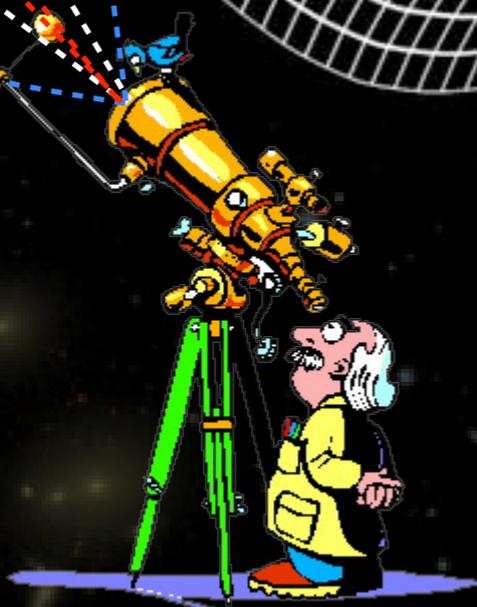
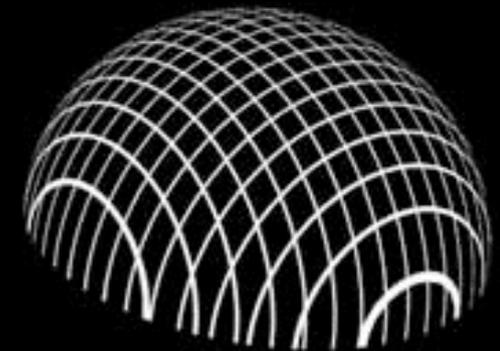
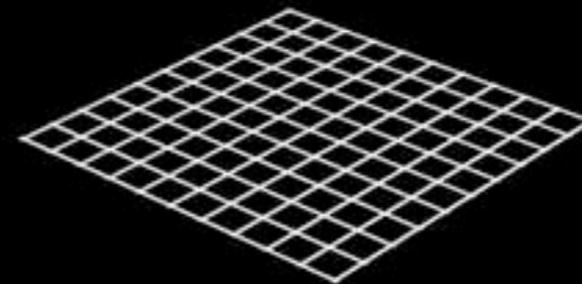
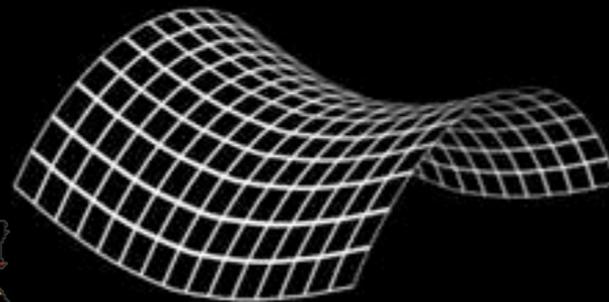
Ouvert



Plat



Fermé



Mais : C'est un plus compliqué que cela
à cause de la dégénérescence
avec H et Λ

Le spectre de puissance

- Développement en harmoniques sphériques

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi)$$

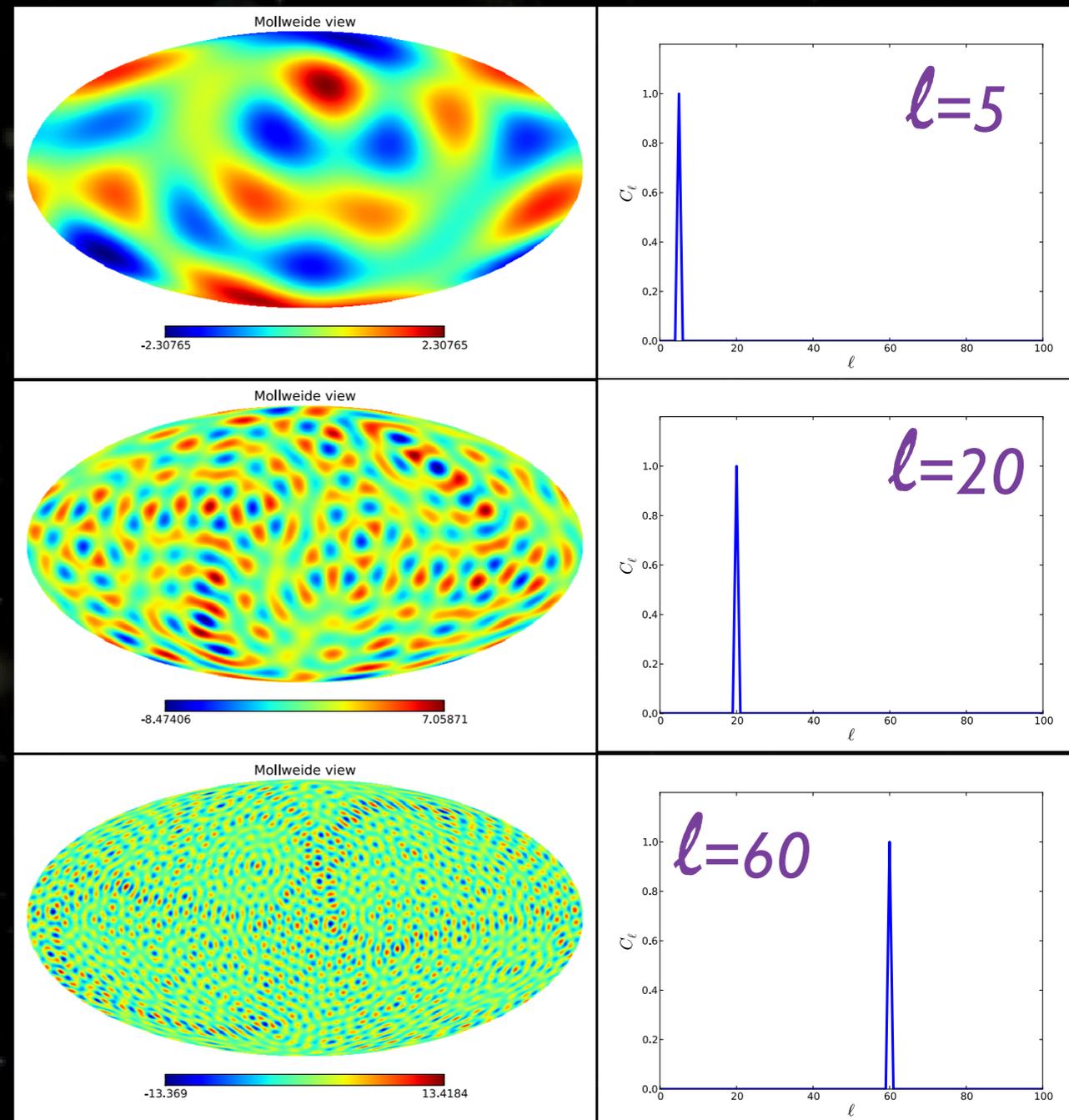
- Spectre de puissance angulaire

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$$

- ℓ est l'inverse d'un angle

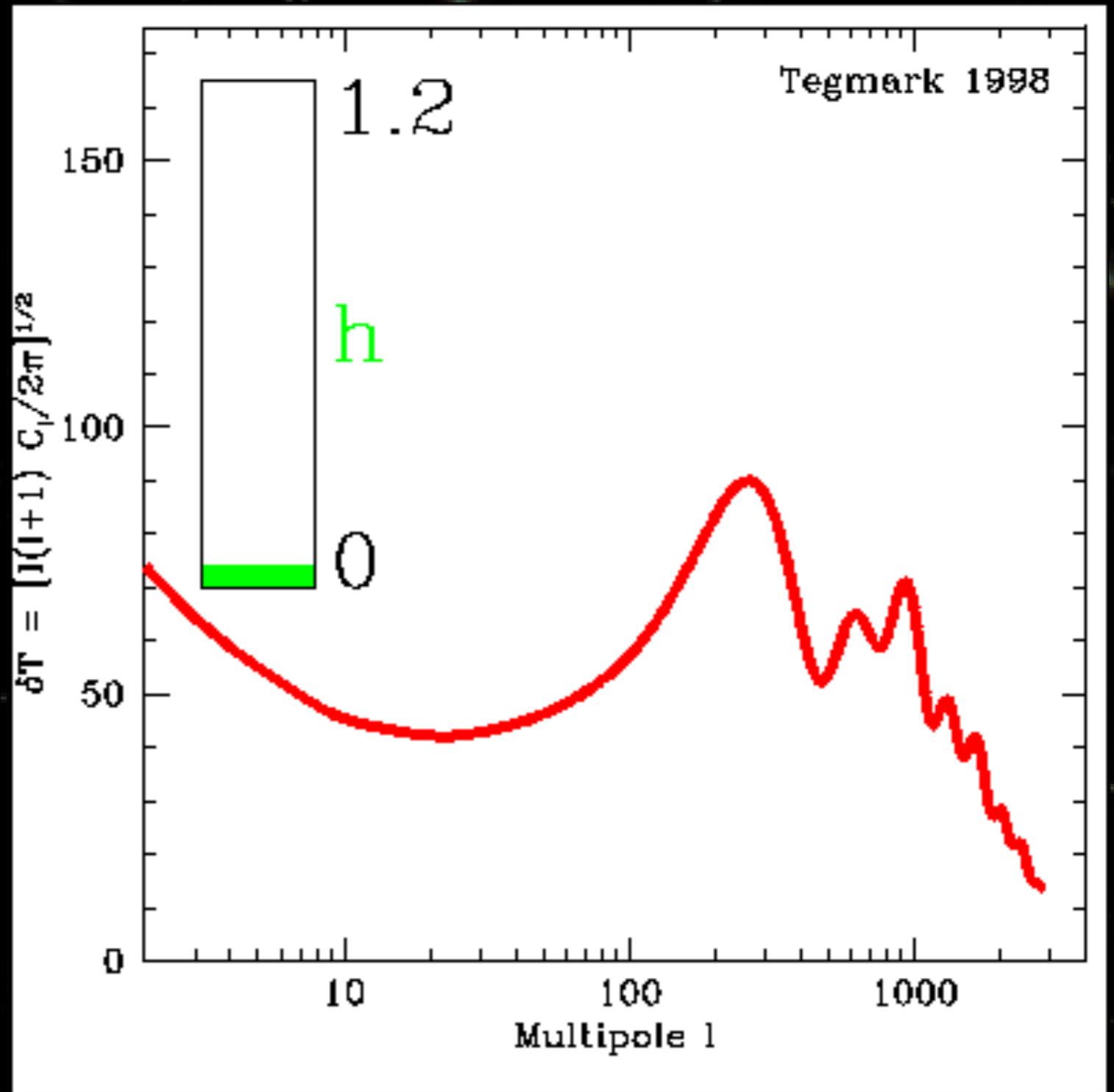
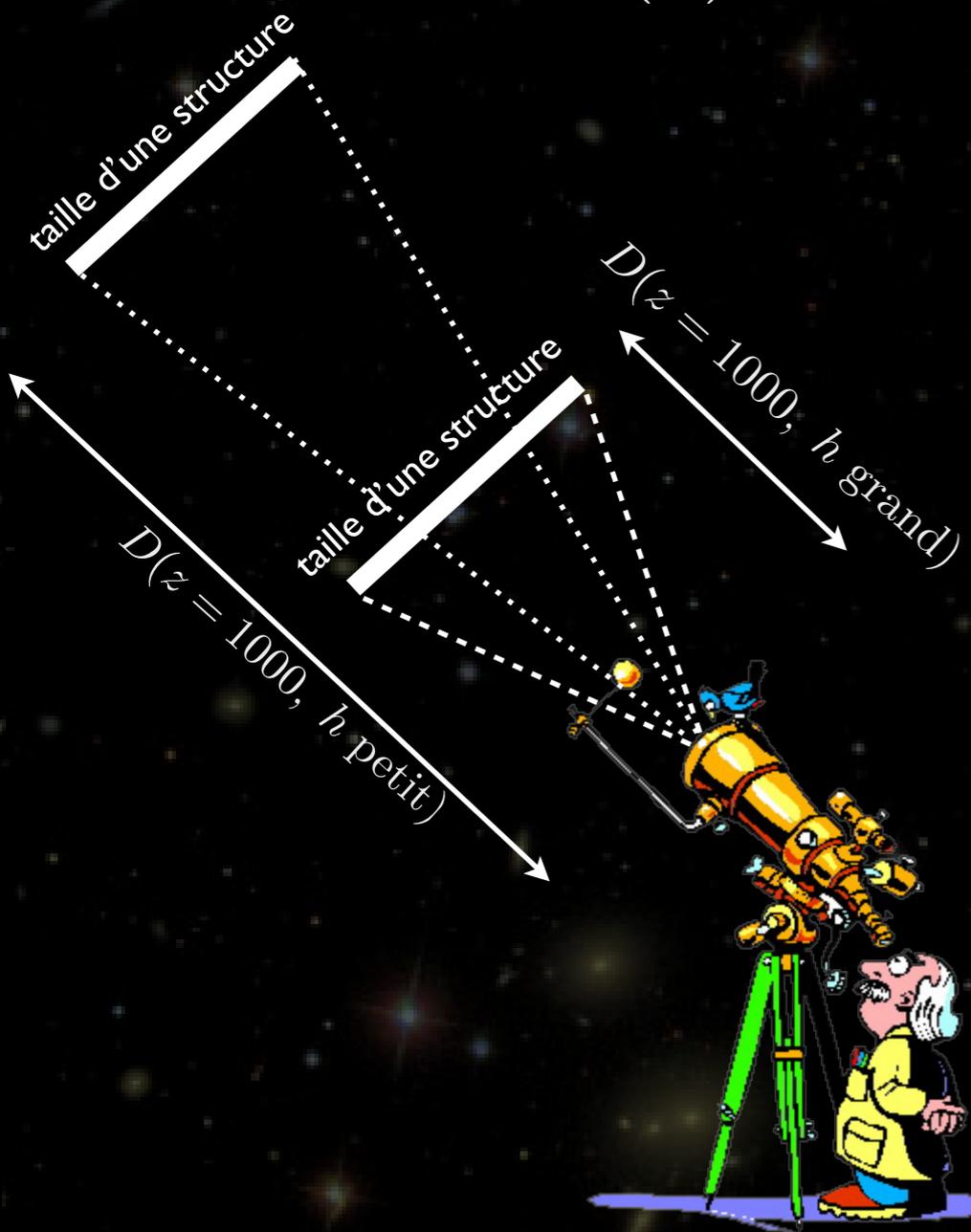
$$\ell = 200 \leftrightarrow \theta = 1 \text{deg.}$$

Amplitude des structures en fonction de leur taille angulaire



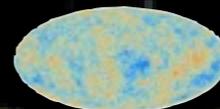
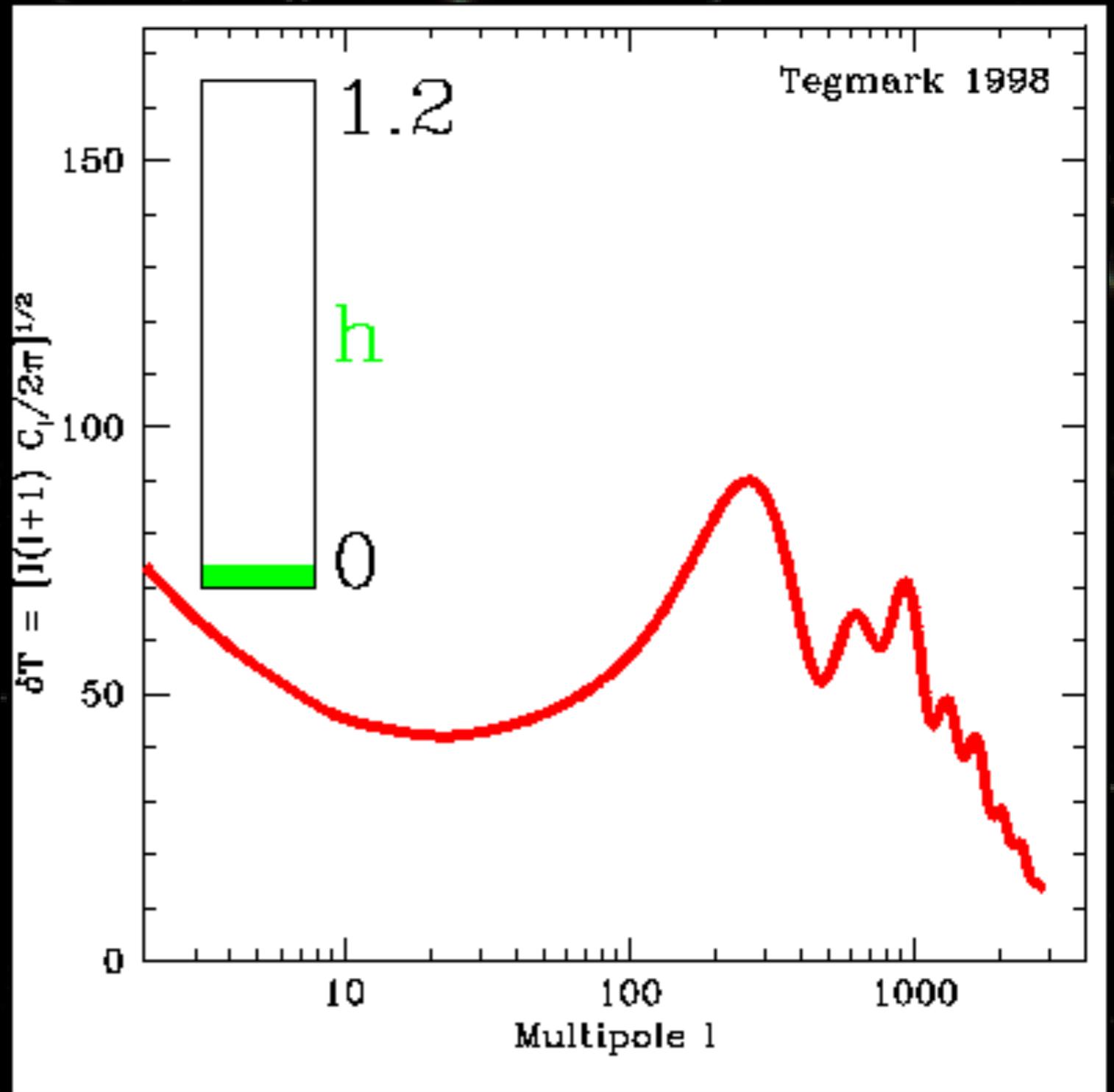
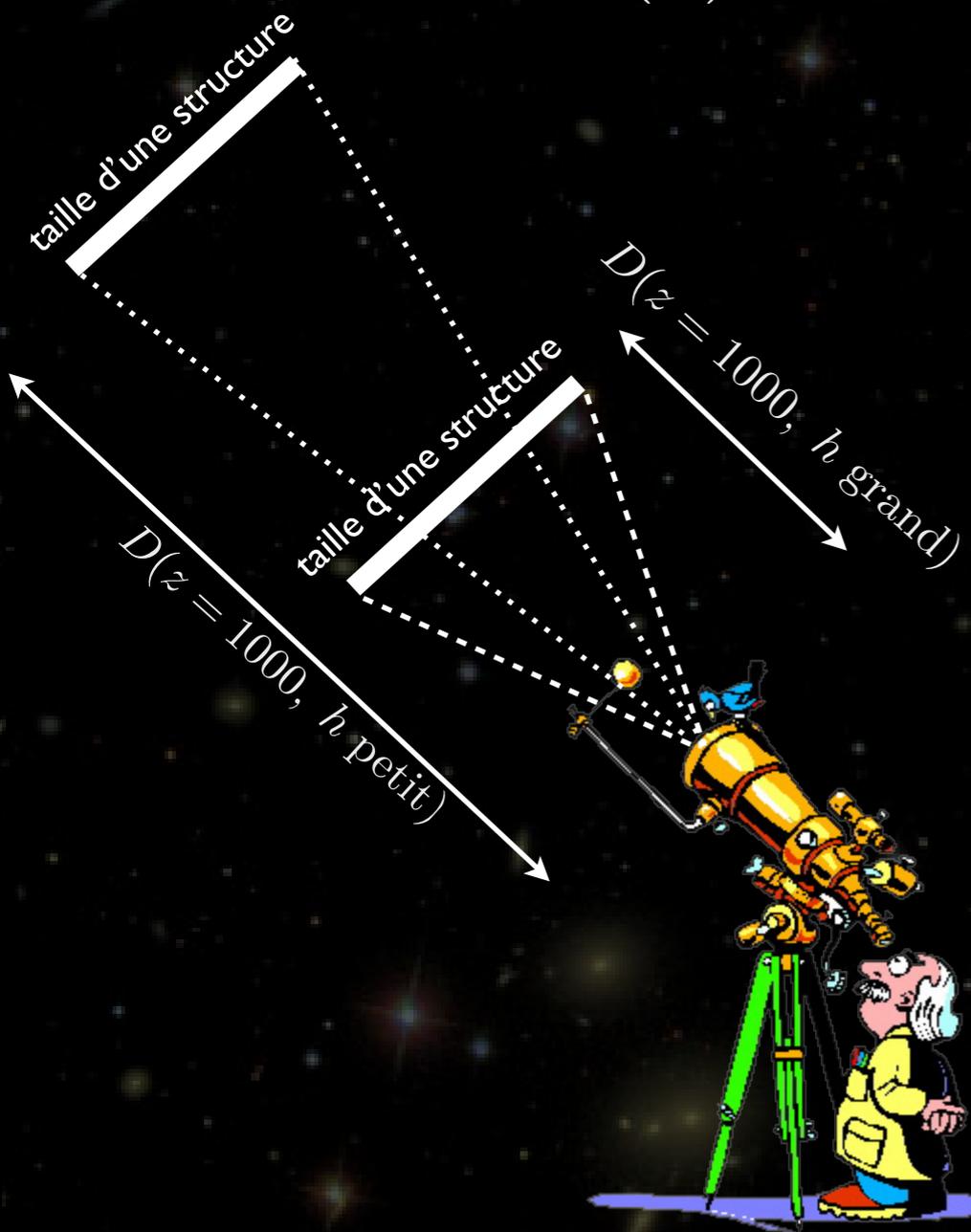
Constante de Hubble

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

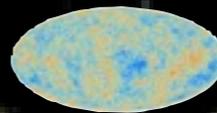
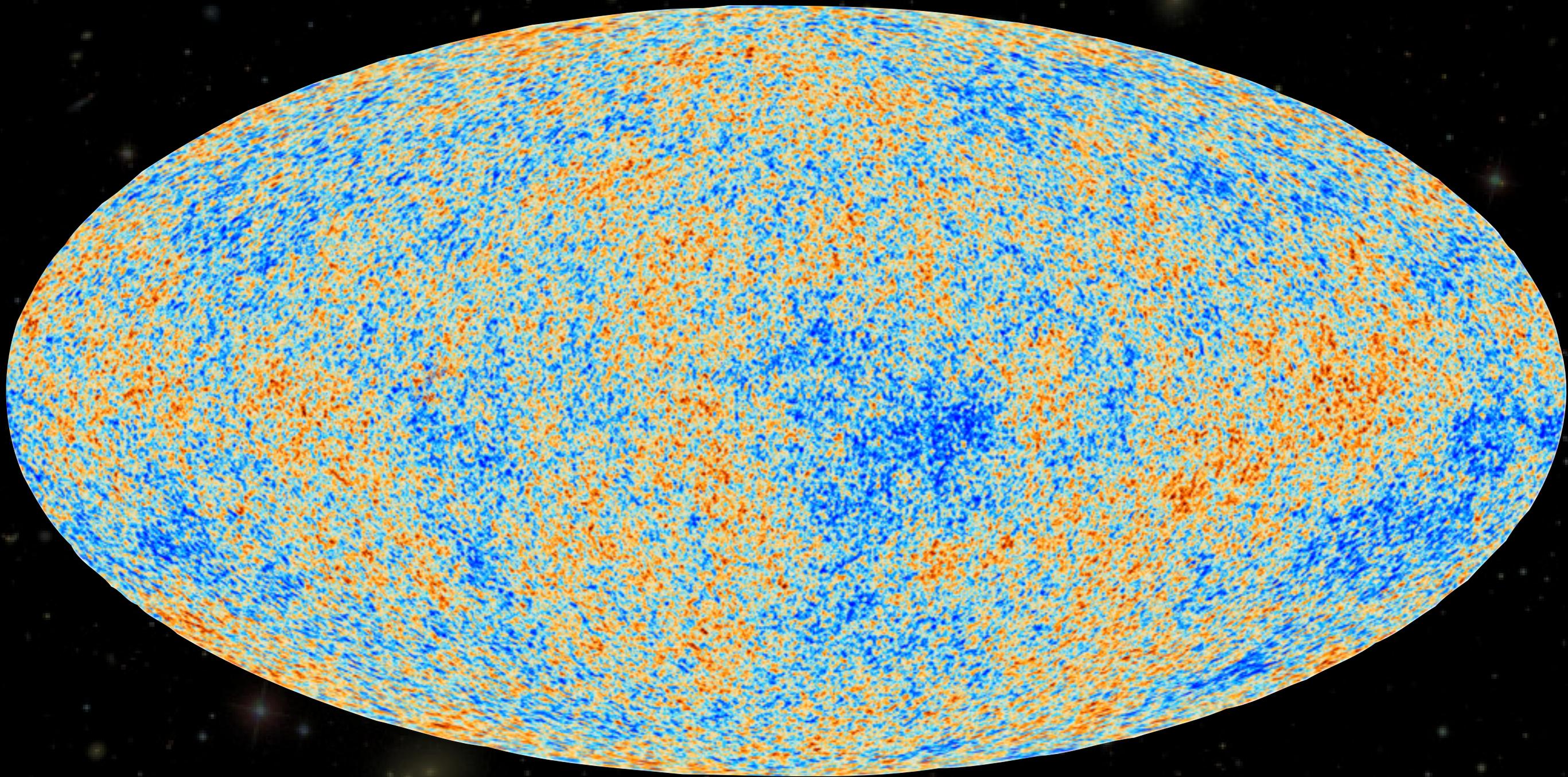


Constante de Hubble

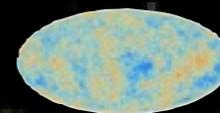
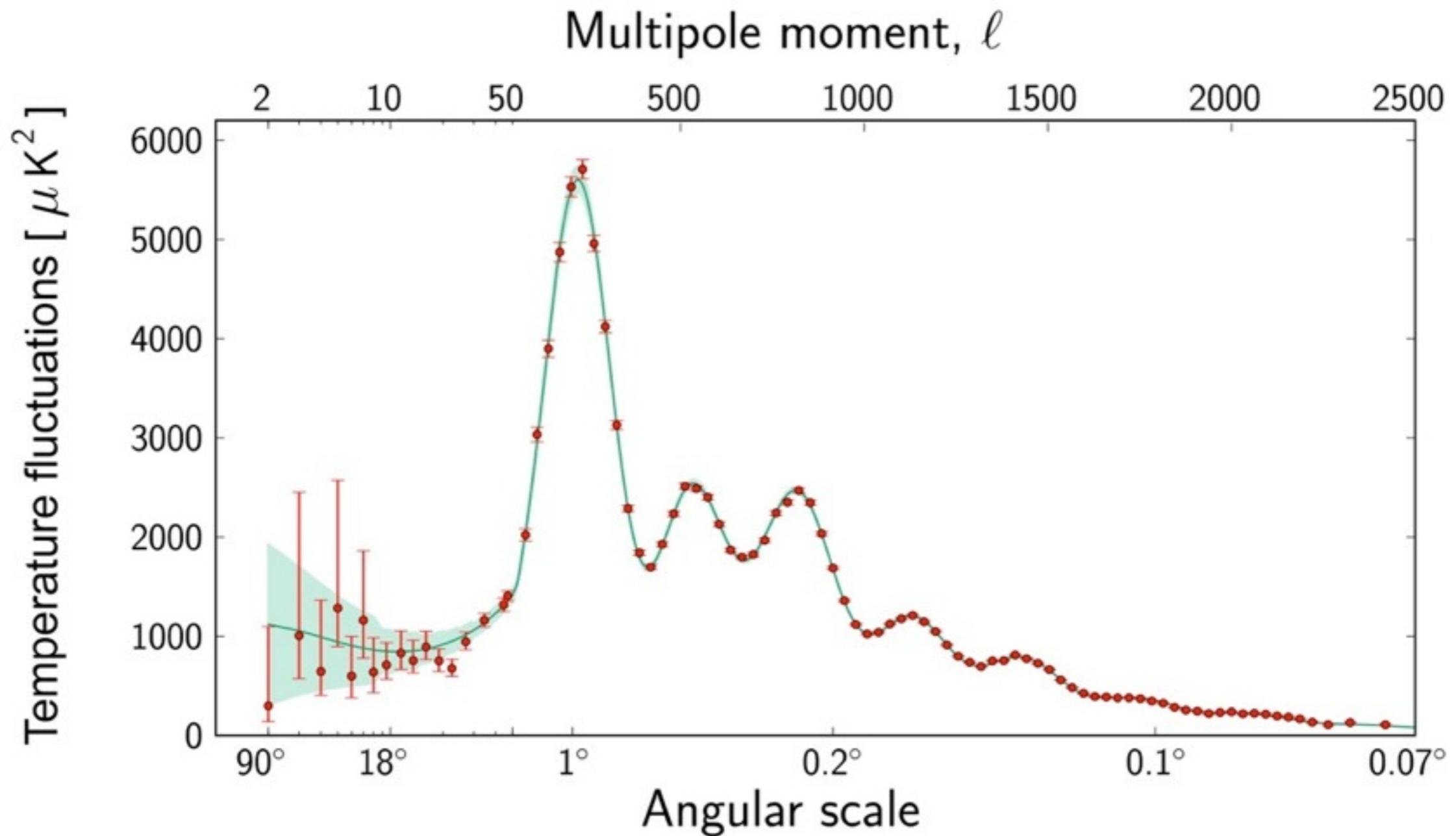
$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$



Résultats de Planck



Résultats de Planck



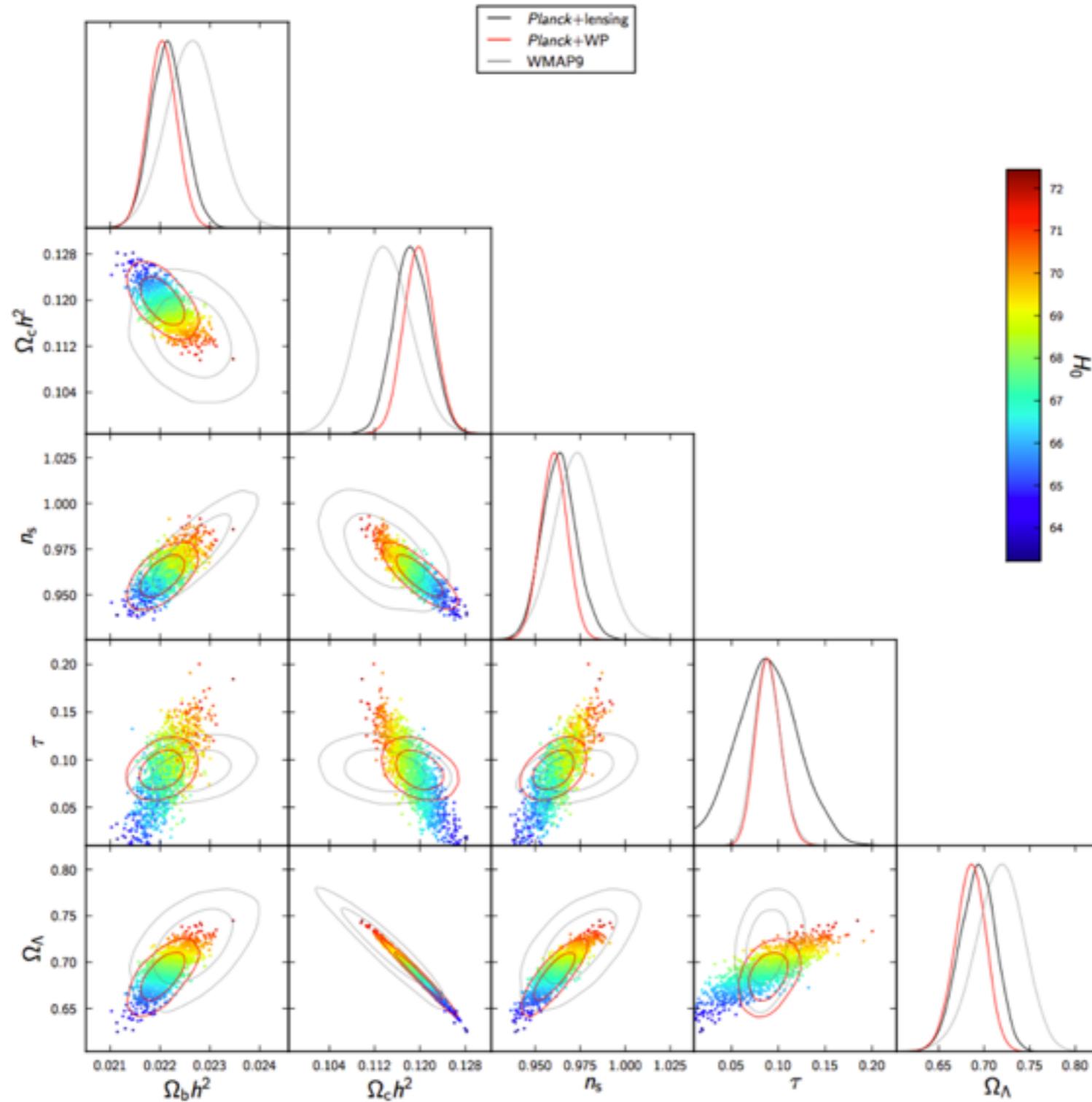
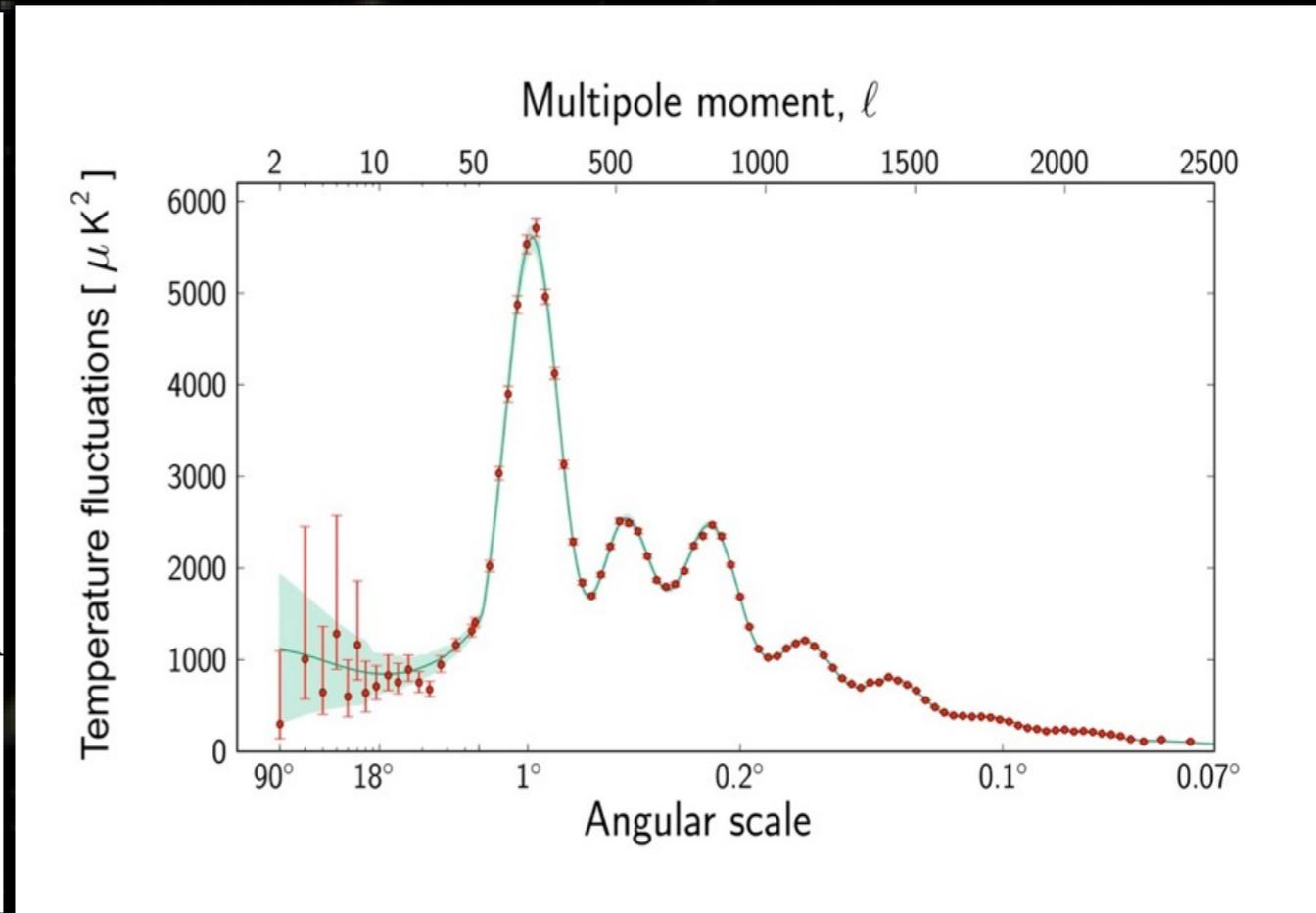
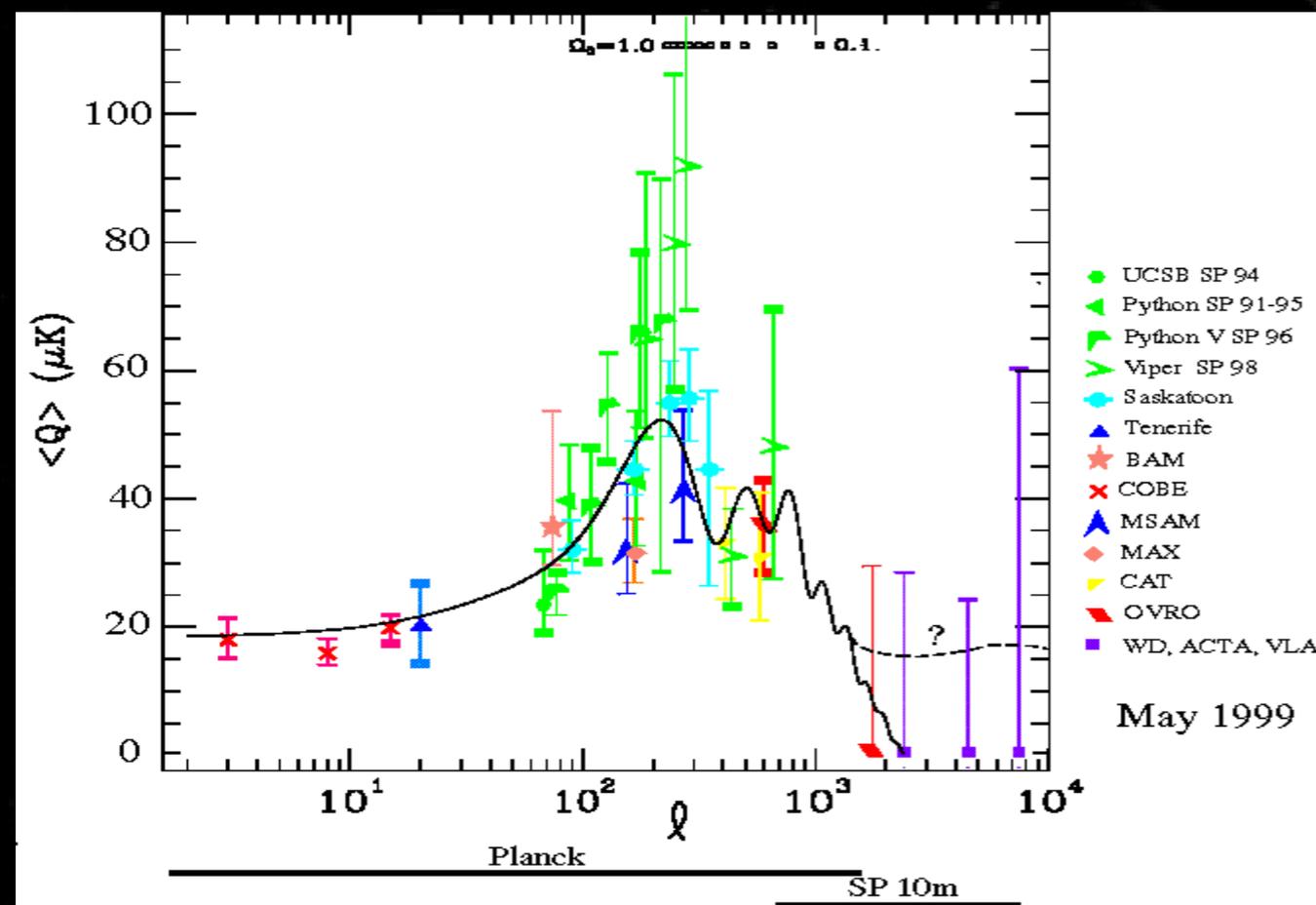


Fig. 2. Comparison of the base Λ CDM model parameters for *Planck*+lensing only (colour-coded samples), and the 68% and 95% constraint contours adding *WMAP* low- ℓ polarization (WP; red contours), compared to *WMAP*-9 (Bennett et al. 2012; grey contours).

un domaine bouillonnant...



1999

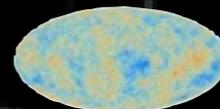
2013

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

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

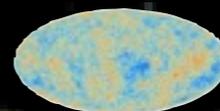
Conclusion vendeuse

- La cosmologie scientifique est née en 1915
- Le modèle actuel a été établi en 1948
- Ces dernières années ont vu la cosmologie faire des avancées observationnelles spectaculaires
- On mesure les paramètres cosmologiques à mieux qu'1%
 - ★ Les preuves de l'existence de matière noire s'accumulent
 - ★ On a montré que 70% de l'énergie est sous forme d'énergie sombre
 - ★ Le modèle cosmologique Λ CDM colle parfaitement aux données



Complément honnête à la conclusion

- Pour autant, de nombreuses questions restent ouvertes
 - ★ Qu'est ce que la matière noire ?
 - ★ Qu'est-ce que l'énergie sombre ?
 - ★ Que s'est il passé dans les premiers instants de l'Univers ?



Conclusion vraiment honnête

La cosmologie progresse

