

# La cosmologie aujourd'hui



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

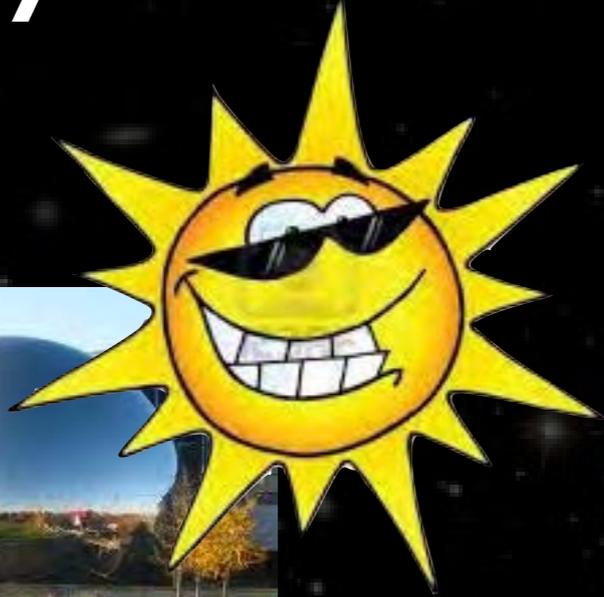
# Au menu:

- Les échelles de l'Univers
  - ★ L'Univers, c'est très vaste...
- Les piliers de la cosmologie et le modèle du Big-Bang
  - ★ La Relativité Générale
  - ★ L'expansion de l'Univers
  - ★ L'Univers semble globalement homogène et isotrope
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
  - ★ La matière noire
  - ★ L'énergie sombre
  - ★ Le fond diffus cosmologique (CMB - rayonnement à 3K)

# Au menu:

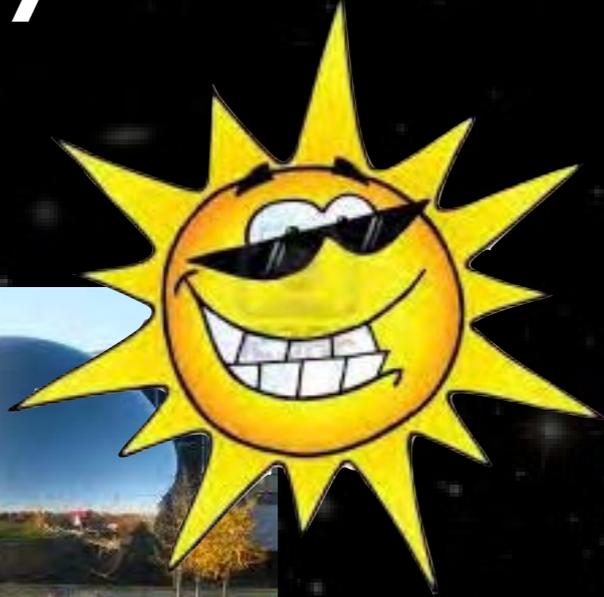
- Les échelles de l'Univers
  - ★ L'Univers c'est très vaste...
- Les piliers de la cosmologie et le modèle du Big-Bang
  - ★ La Relativité Générale
  - ★ L'expansion de l'Univers
  - ★ L'Univers semble globalement homogène et isotrope
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
  - ★ La matière noire
  - ★ L'énergie sombre
  - ★ Le fond diffus cosmologique (CMB - rayonnement à 3K)

# Le système solaire (vu par un parisien)

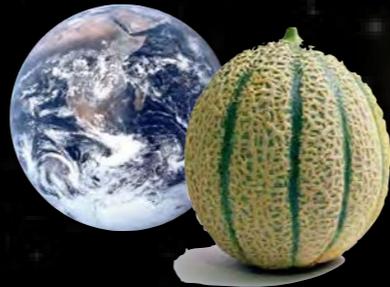


Soleil : La géode  
18m à la Villette

# Le système solaire (vu par un parisien)

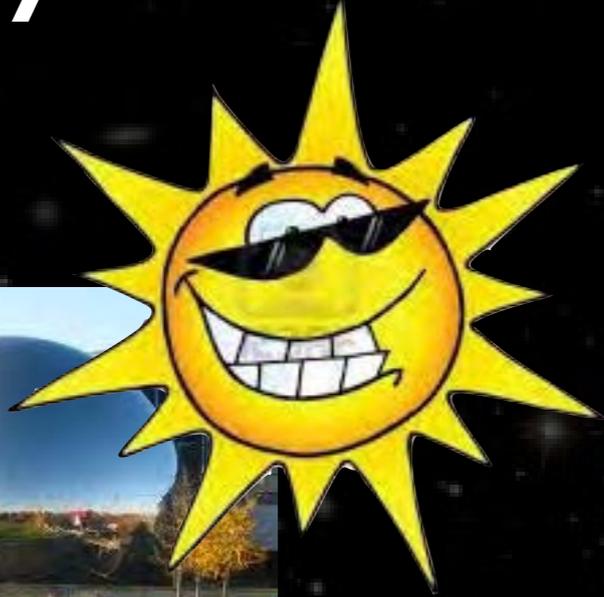


Soleil : La géode  
18m à la Villette

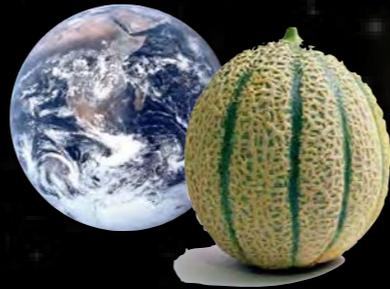


Terre: melon à 1.5km  
(Place de la République)

# Le système solaire (vu par un parisien)



Soleil : La géode  
18m à la Villette

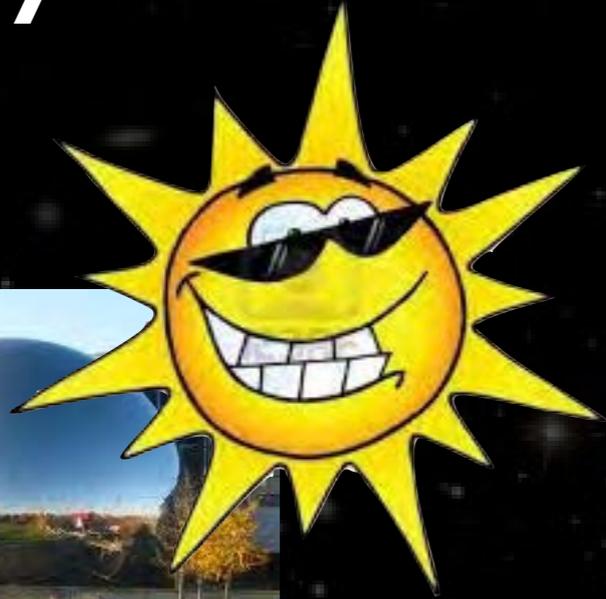


Terre: melon à 1.5km  
(Place de la République)

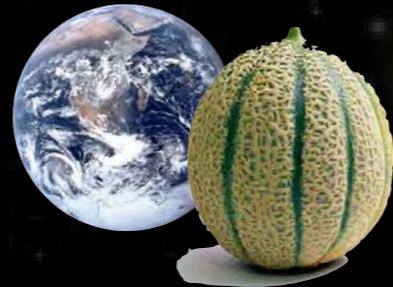
Lune : abricot  
à 5m



# Le système solaire (vu par un parisien)



Soleil : La géode  
18m à la Villette



Terre: melon à 1.5km  
(Place de la République)

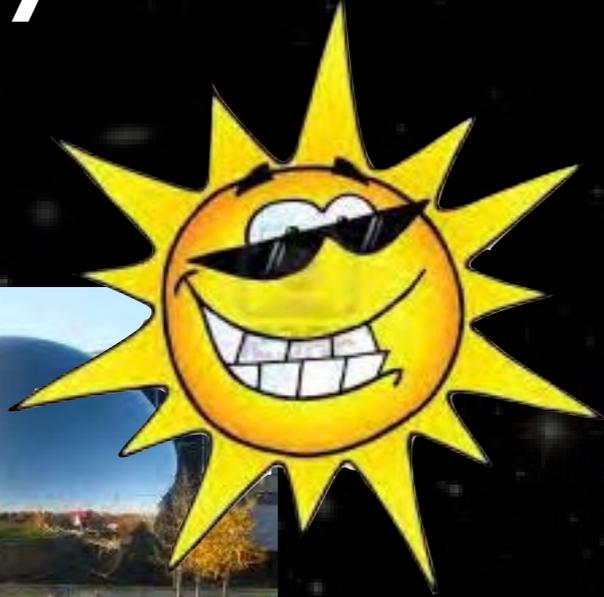
Lune : abricot  
à 5m



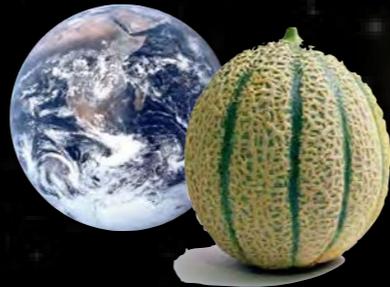
Neptune:  
Ballon-Sauteur  
à Fontainebleau



# Le système solaire (vu par un parisien)



Soleil : La géode  
18m à la Villette

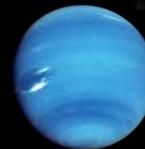


Terre: melon à 1.5km  
(Place de la République)

Lune : abricot  
à 5m



Neptune:  
Ballon-Sauteur  
à Fontainebleau



La plus proche étoile (4 a.l.):  
1,5x plus lointaine la Lune



# La Galaxie

Système solaire



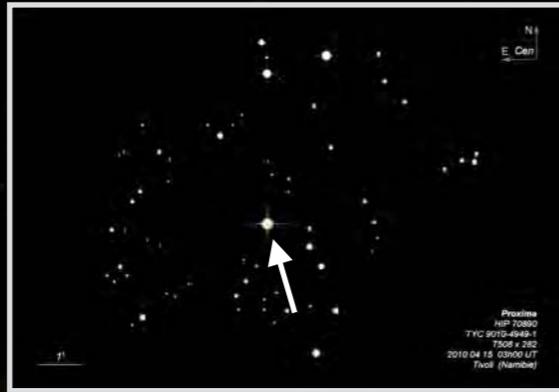
Une noix

# La Galaxie

Systeme solaire



Plus proche étoile  
(4 a.l.)



Une noix



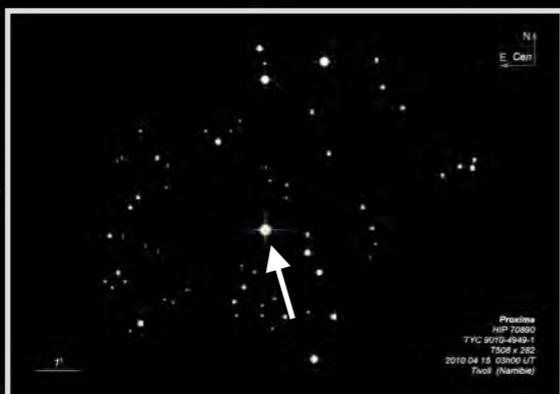
Un immeuble  
de 30 étages

# La Galaxie

Systeme solaire



Plus proche étoile  
(4 a.l.)



Notre Galaxie  
10 milliards d'étoiles



Une noix



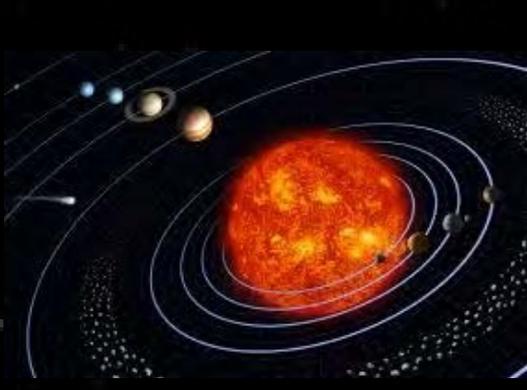
Un immeuble  
de 30 étages



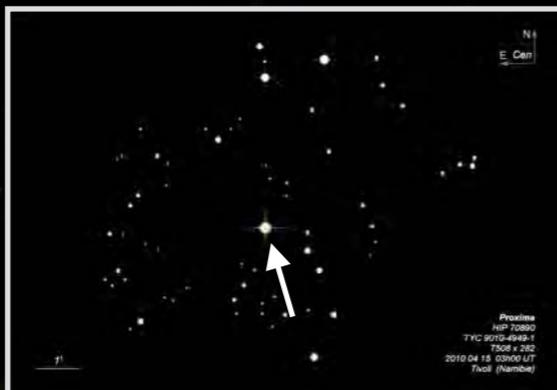
Distance  
Paris-Stockholm

# La Galaxie

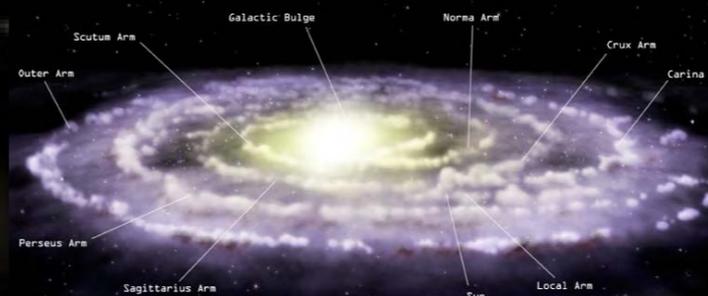
Systeme solaire



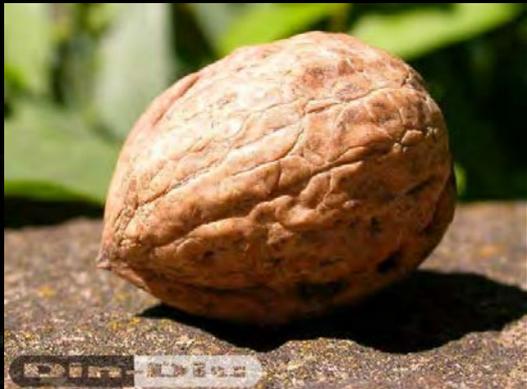
Plus proche étoile  
(4 a.l.)



Notre Galaxie  
10 milliards d'étoiles



La galaxie voisine  
(Andromède)



Une noix



Un immeuble  
de 30 étages



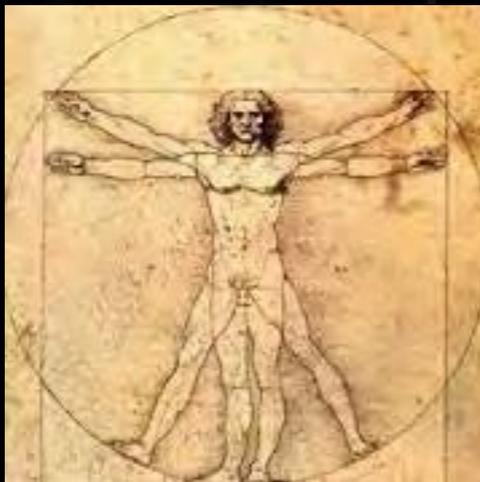
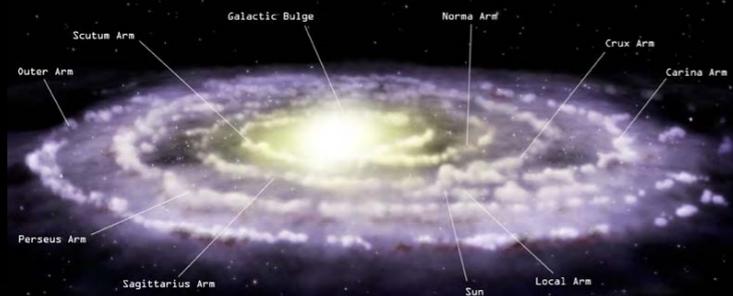
Distance  
Paris-Stockholm



1/7 de la distance  
Terre-Lune

# L'Univers

Notre Galaxie  
10 milliards d'étoiles

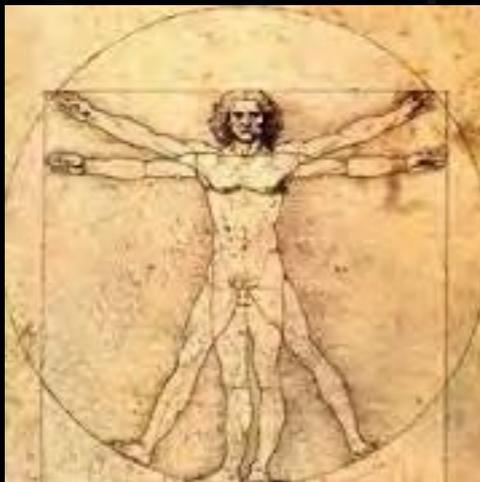
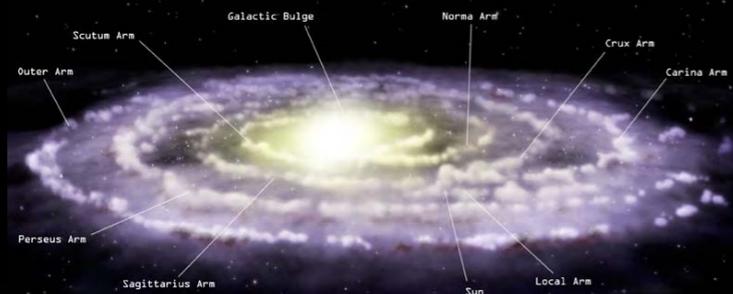


Un humain

# L'Univers

Notre Galaxie

10 milliards d'étoiles (on en connaît des millions)



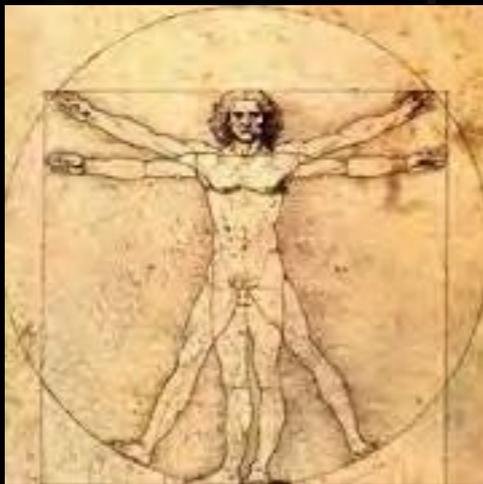
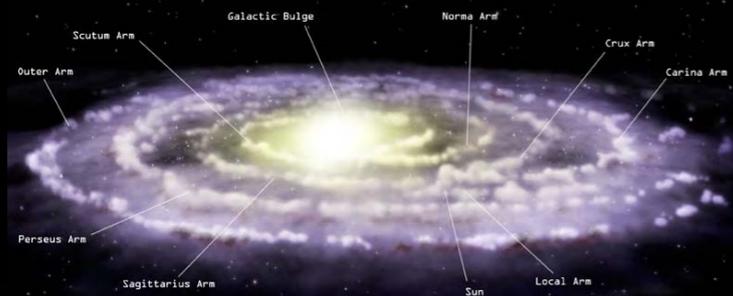
Un humain



Paris-Reims

# L'Univers

Notre Galaxie  
10 milliards d'étoiles (on en connaît des millions)



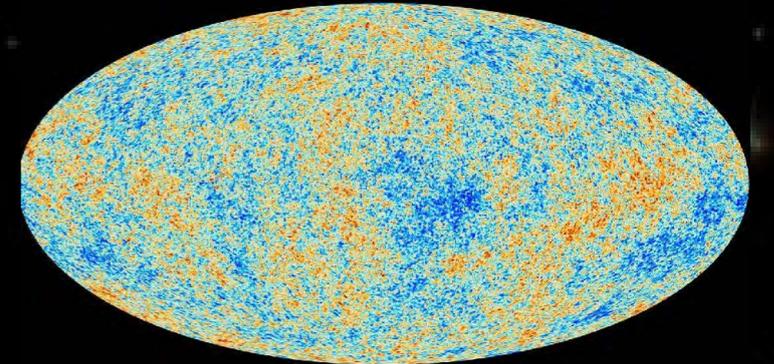
Un humain

Galaxies lointaines  
(on en connaît des millions)



Paris-Reims

Univers Observable



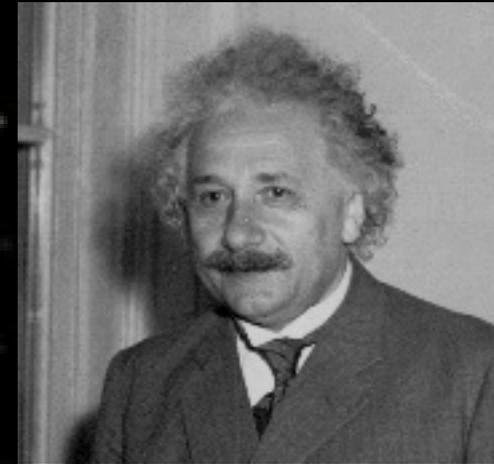
Paris-Rome

# Au menu:

- Les échelles de l'Univers
  - ★ L'Univers c'est très vaste...
- Les piliers de la cosmologie et le modèle du Big-Bang
  - ★ La Relativité Générale
  - ★ L'expansion de l'Univers
  - ★ L'Univers semble globalement homogène et isotrope
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
  - ★ La matière noire
  - ★ L'énergie sombre
  - ★ Le fond diffus cosmologique (CMB - rayonnement à 3K)

# un Univers courbe !

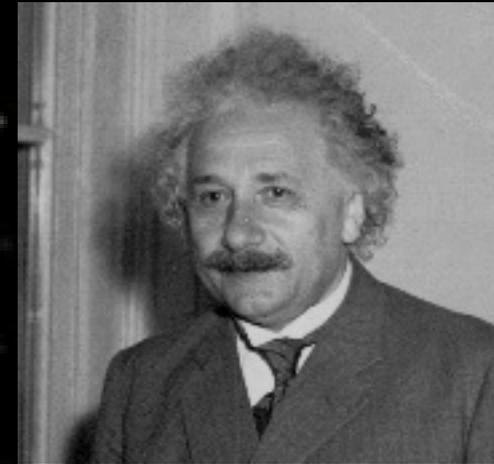
- Théorie de la relativité Générale (1915)
  - ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps
    - ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
    - ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger



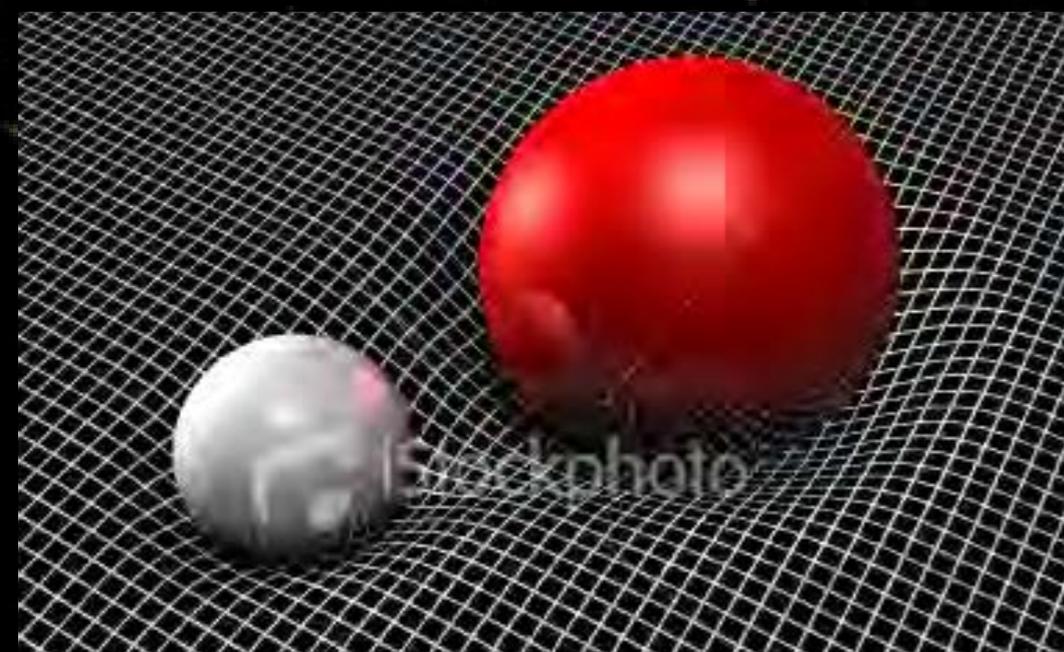
A. Einstein

# 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

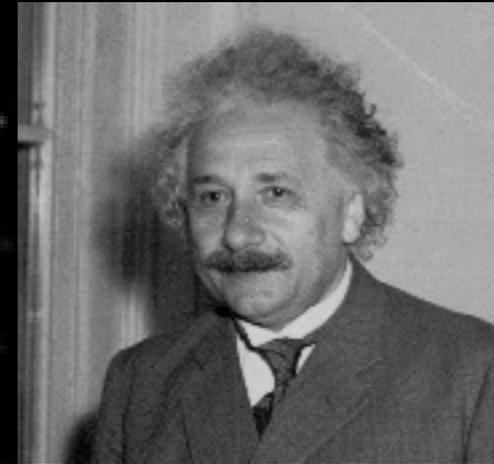


A. Einstein

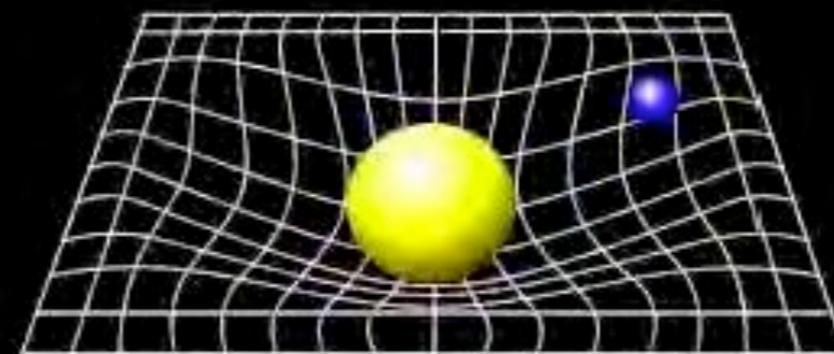
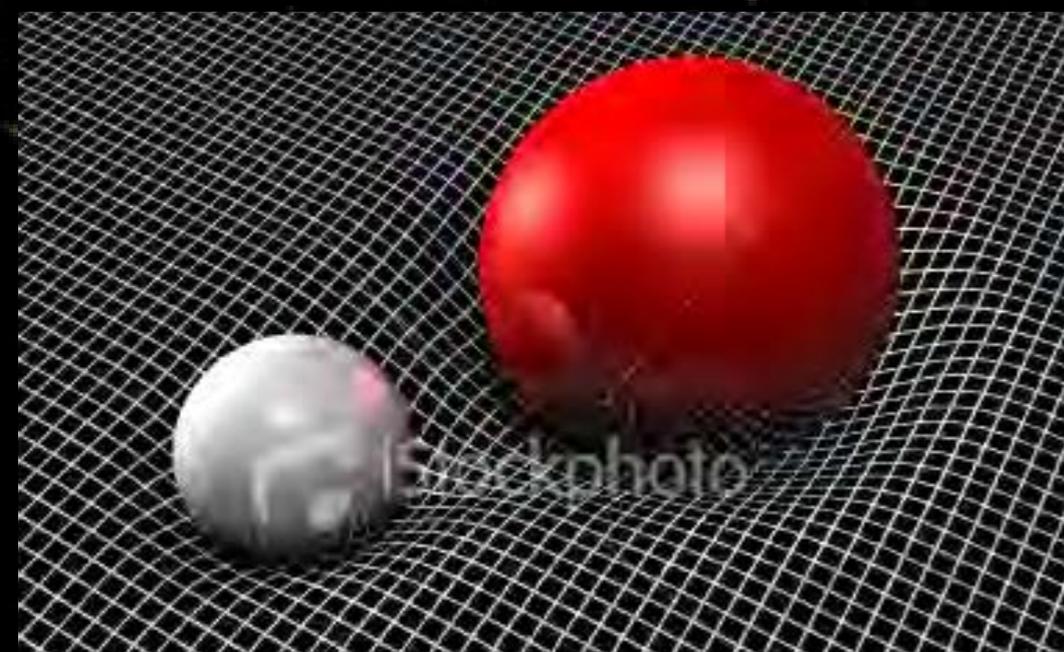


# un Univers courbe !

- 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

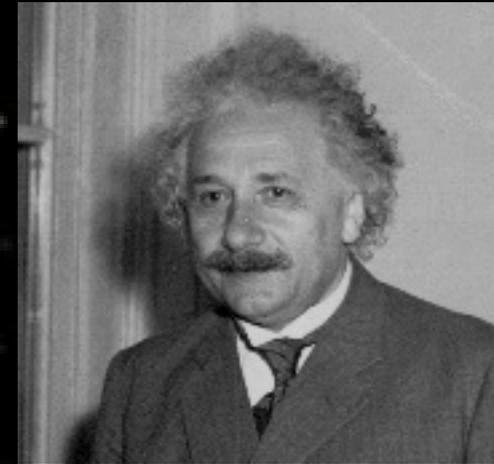


A. Einstein

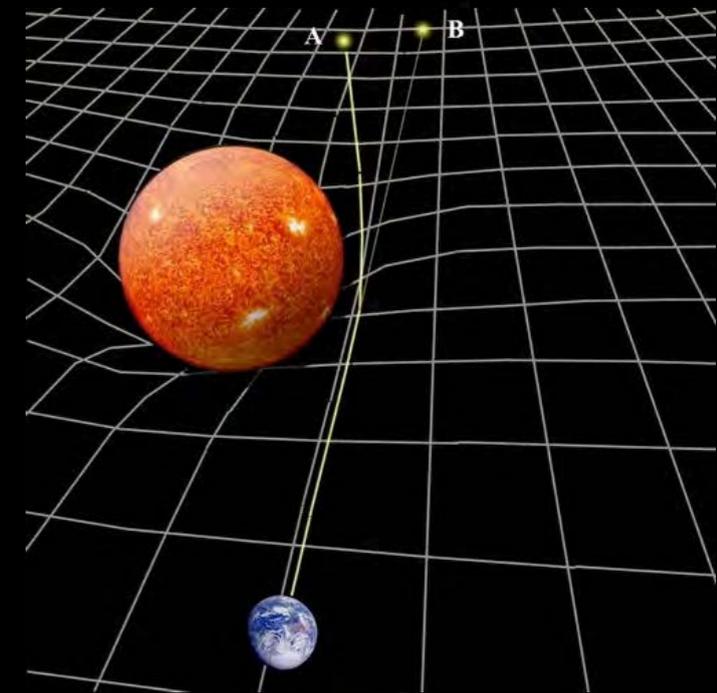
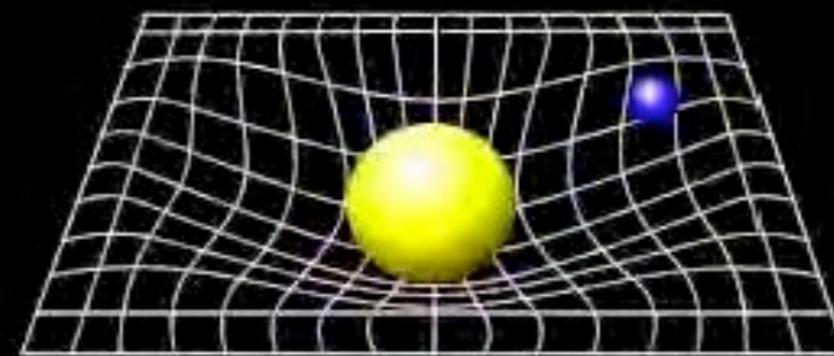
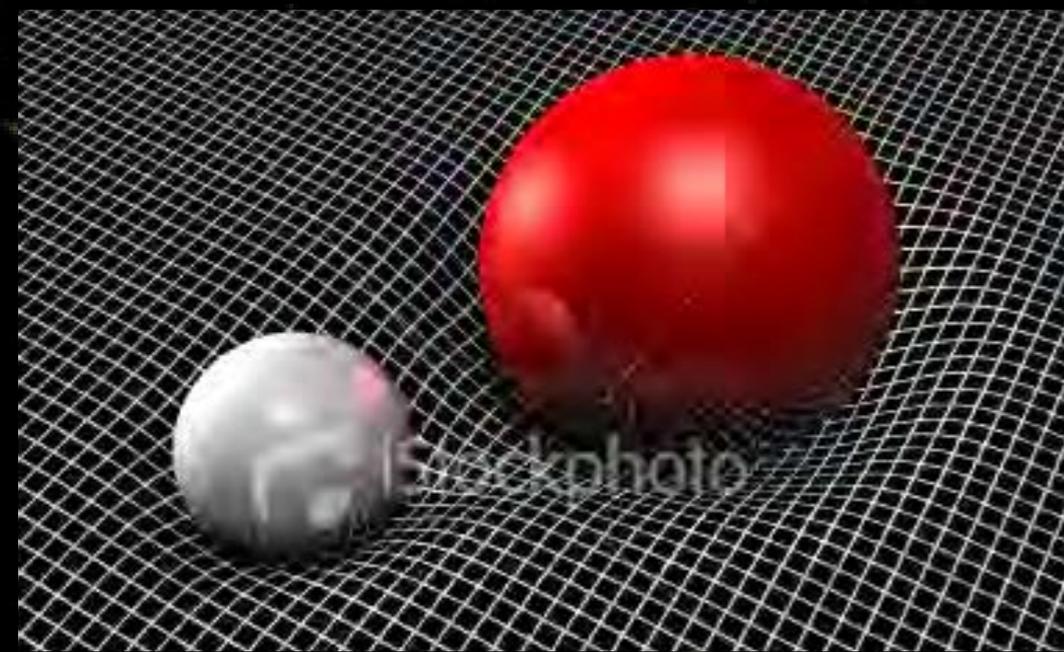


# un Univers courbe !

- 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 !

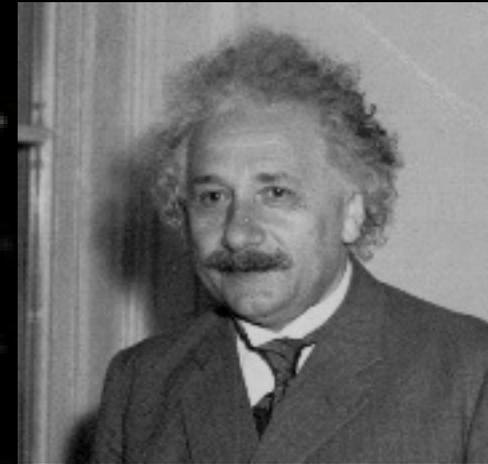
- Théorie de la relativité Générale (1915)

- ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps

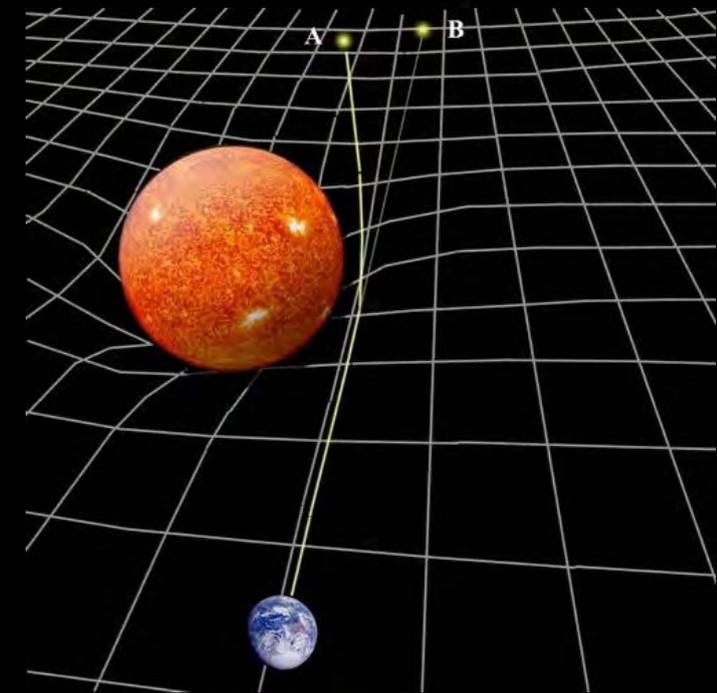
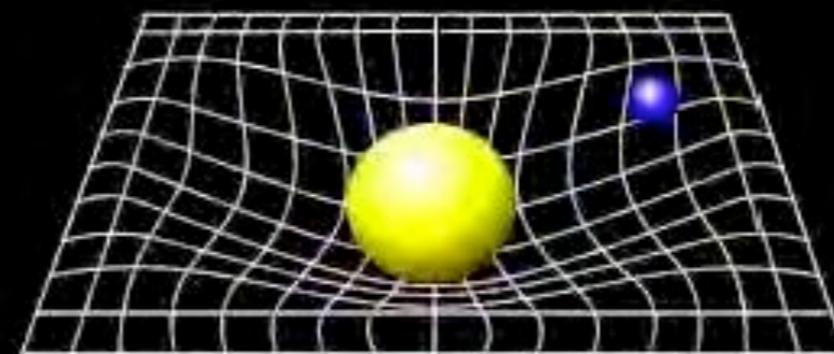
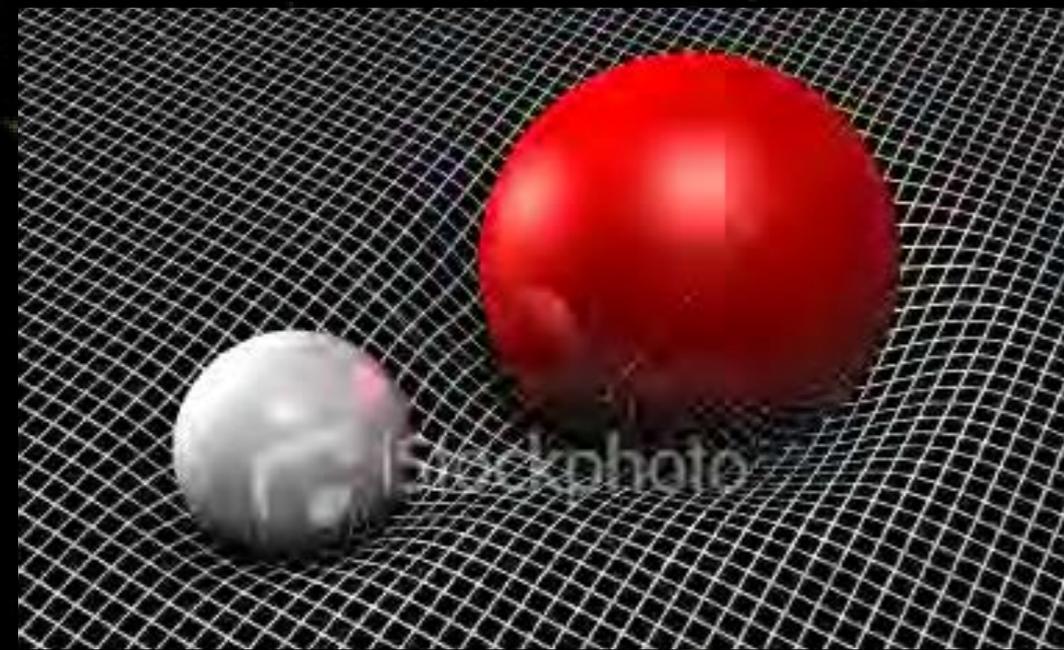
- ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber

- ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

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



A. Einstein



# un Univers courbe !

- Théorie de la relativité Générale (1915)

- ★ La gravitation se manifeste par la courbure de l'espace-temps

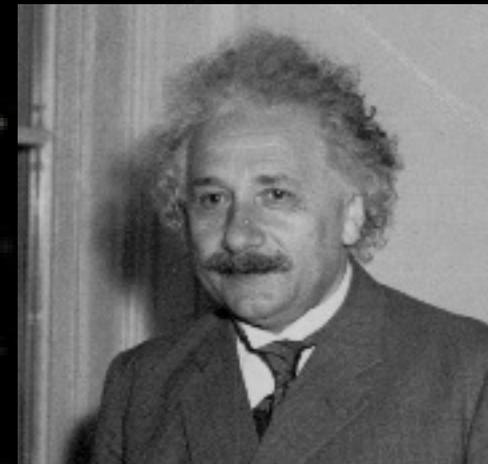
- ▶ La matière indique à l'espace-temps comment se courber
- ▶ L'espace-temps indique à la matière et au rayonnement comment et par où bouger

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

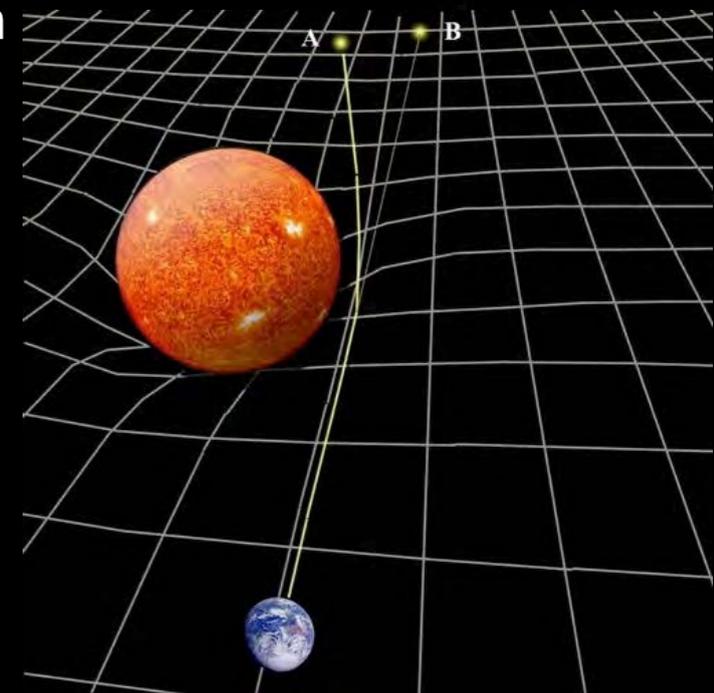
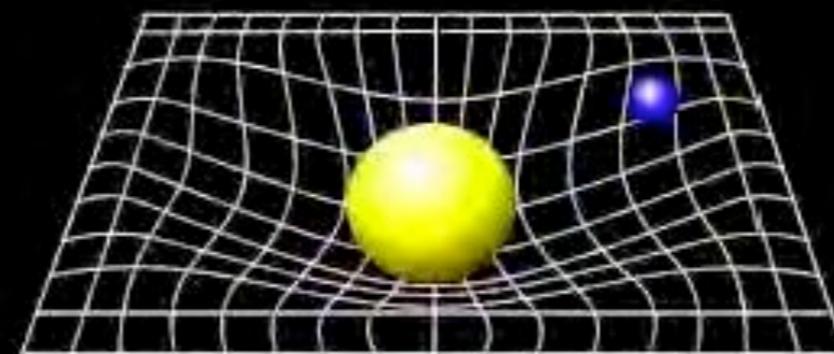
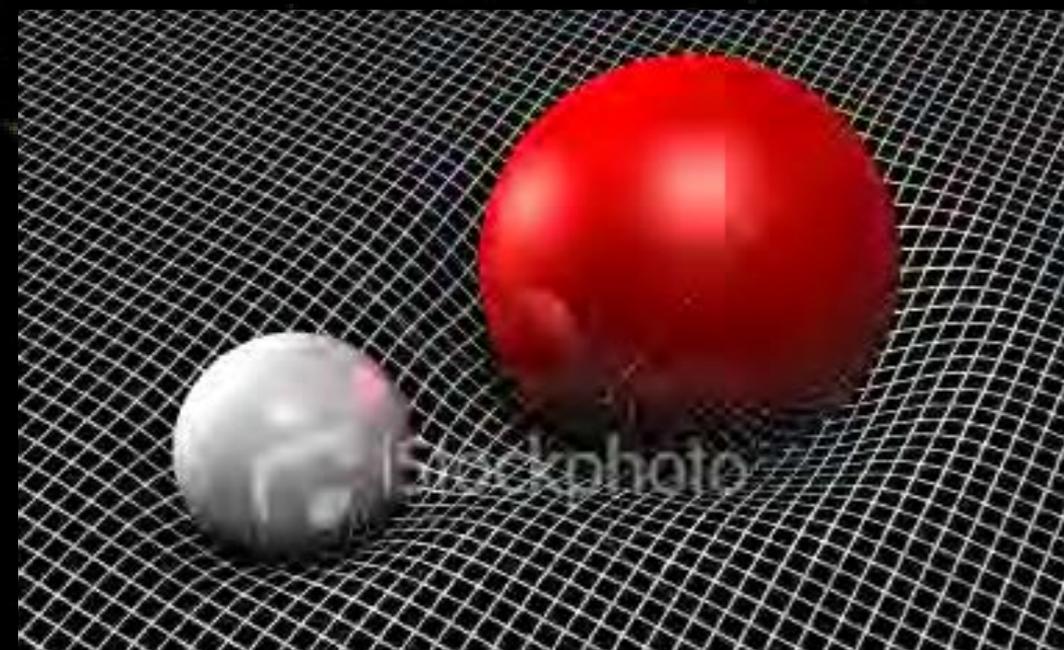
Espace-temps

Contenu matériel

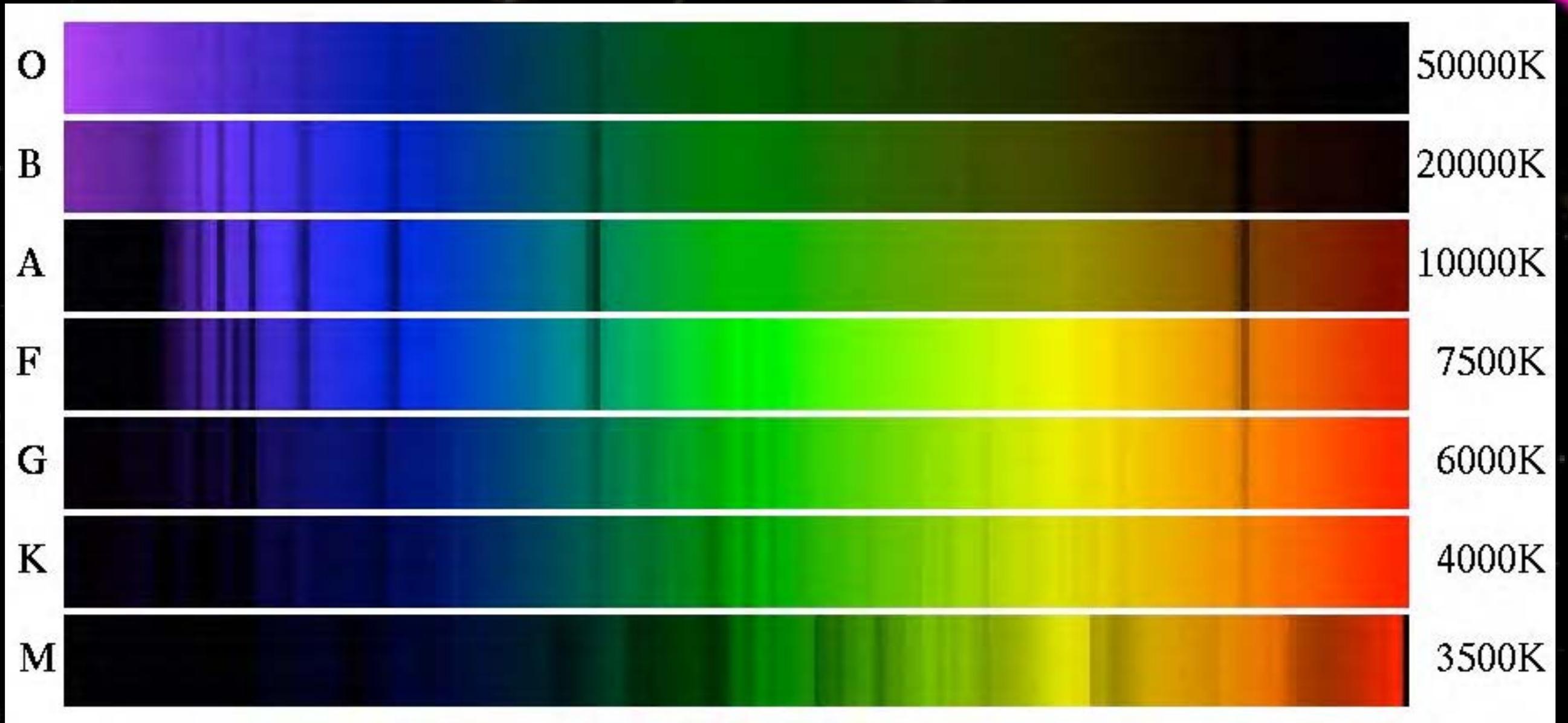
- ▶ L'Univers doit être **dynamique** et non statique !!
- ▶ Einstein refuse cette idée mais pas Lemaître ni Friedman



A. Einstein



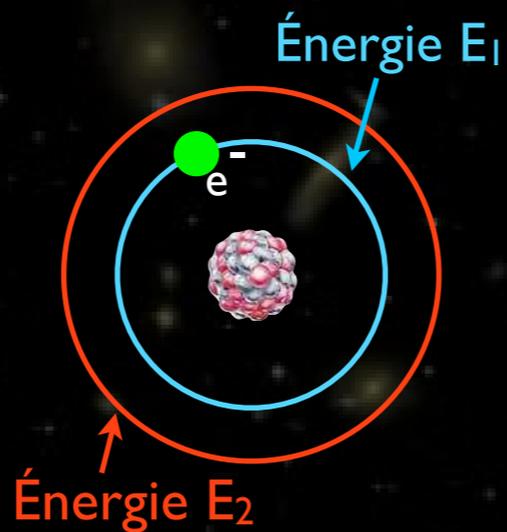
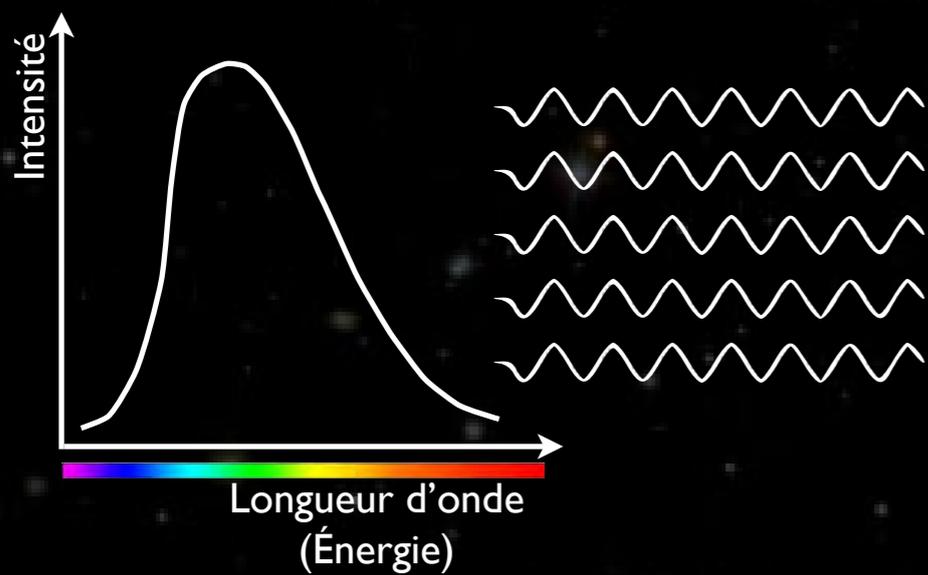
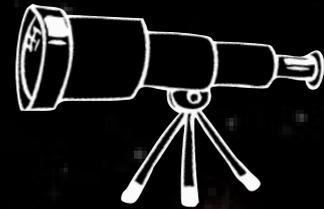
# Spectres d'étoiles



# Raies d'absorption/d'émission

Source lumineuse

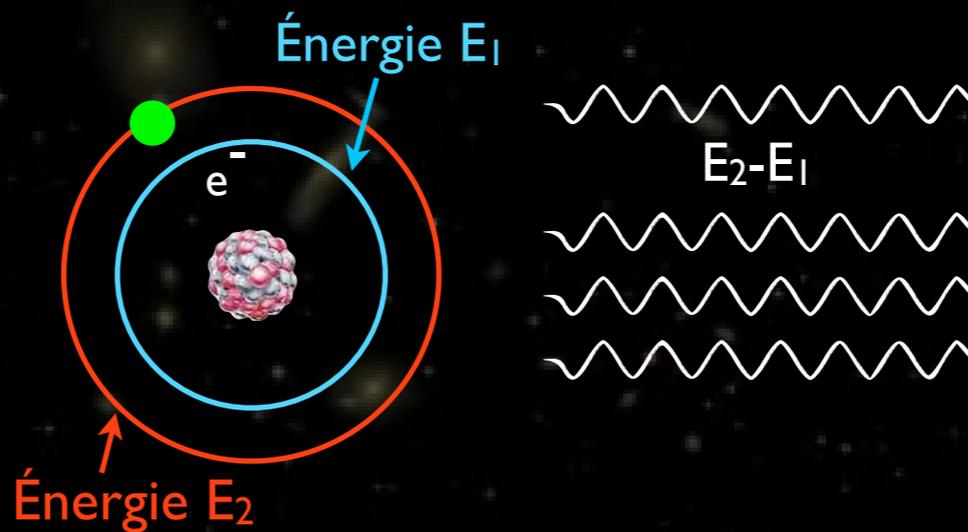
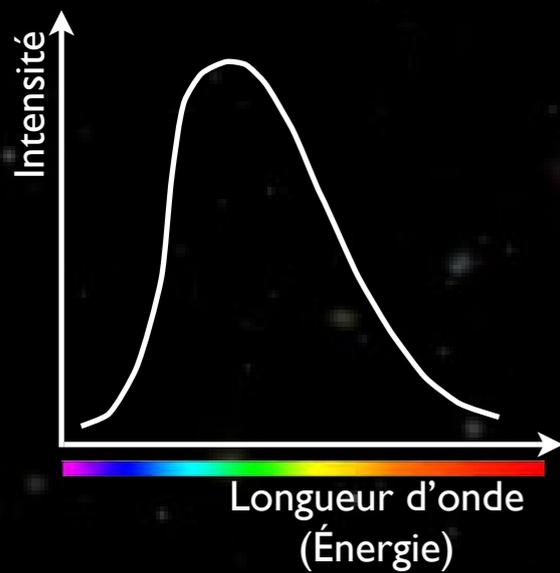
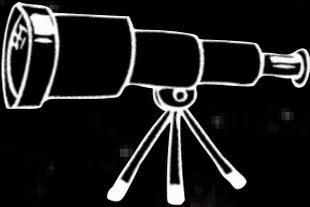
Gaz



# Raies d'absorption/d'émission

Source lumineuse

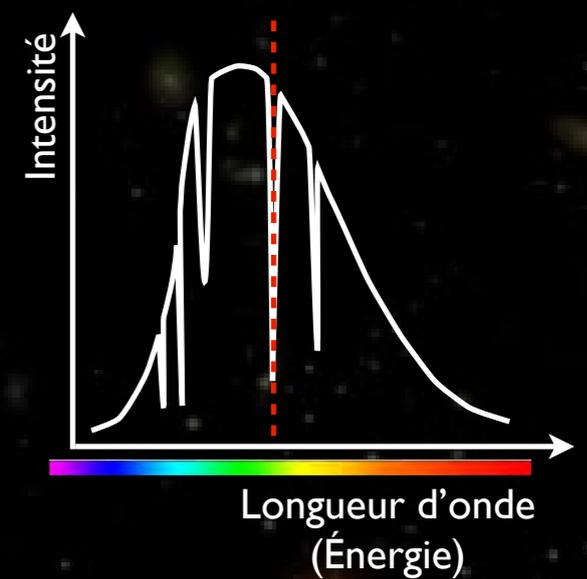
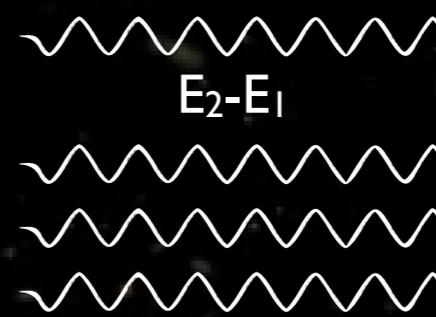
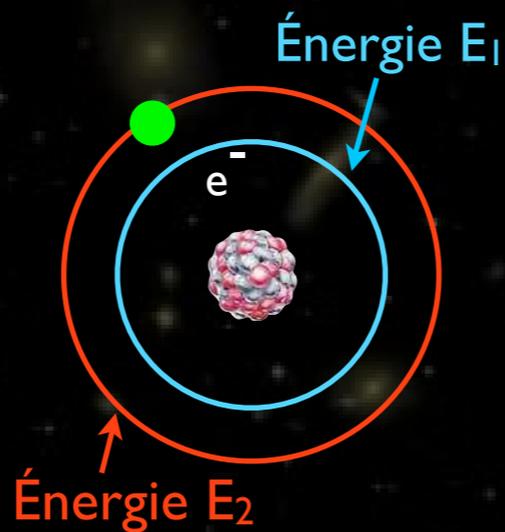
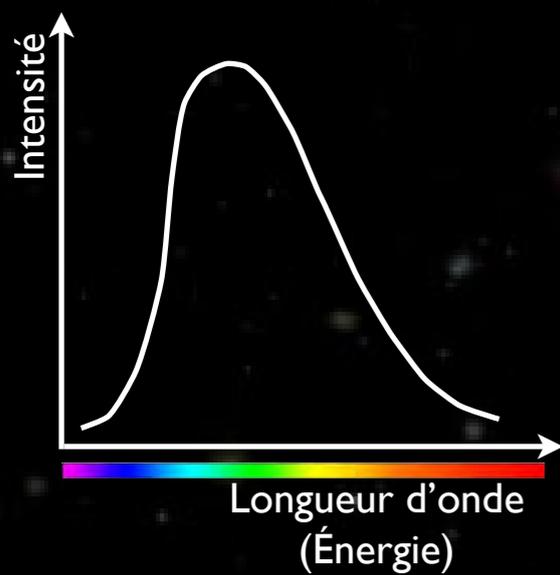
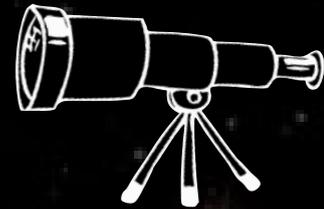
Gaz



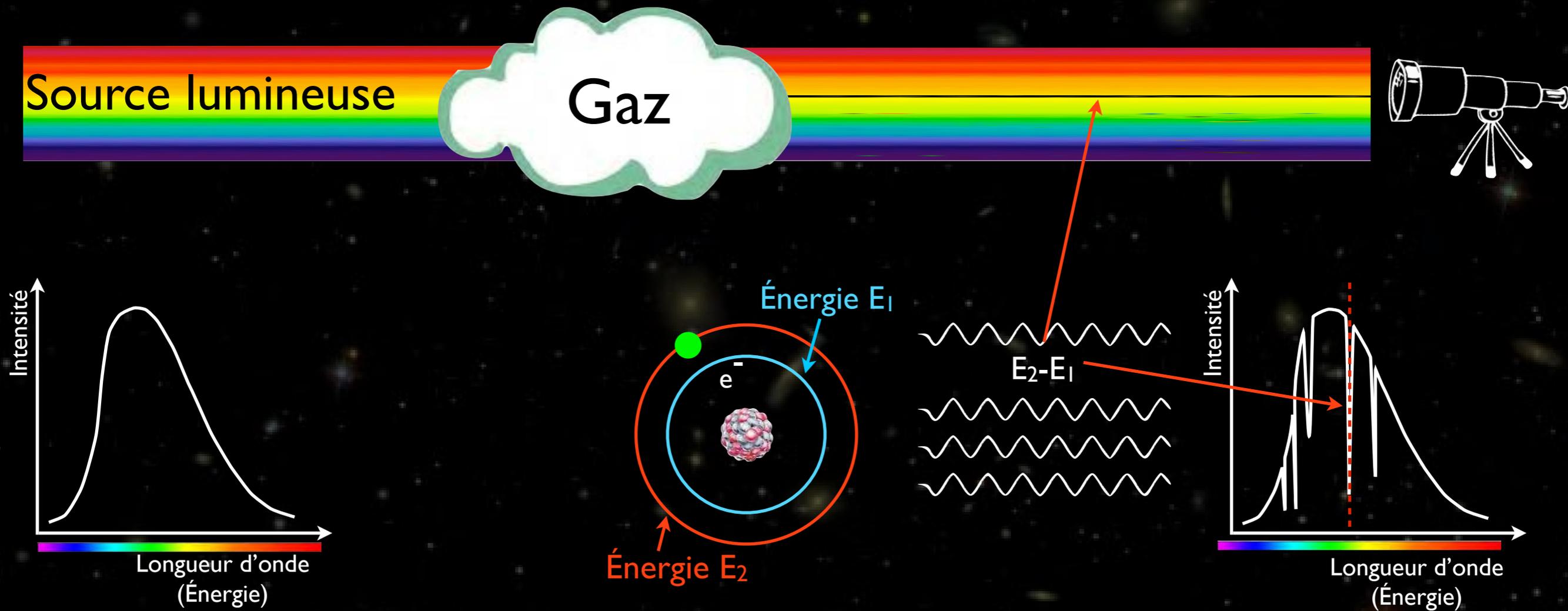
# Raies d'absorption/d'émission

Source lumineuse

Gaz

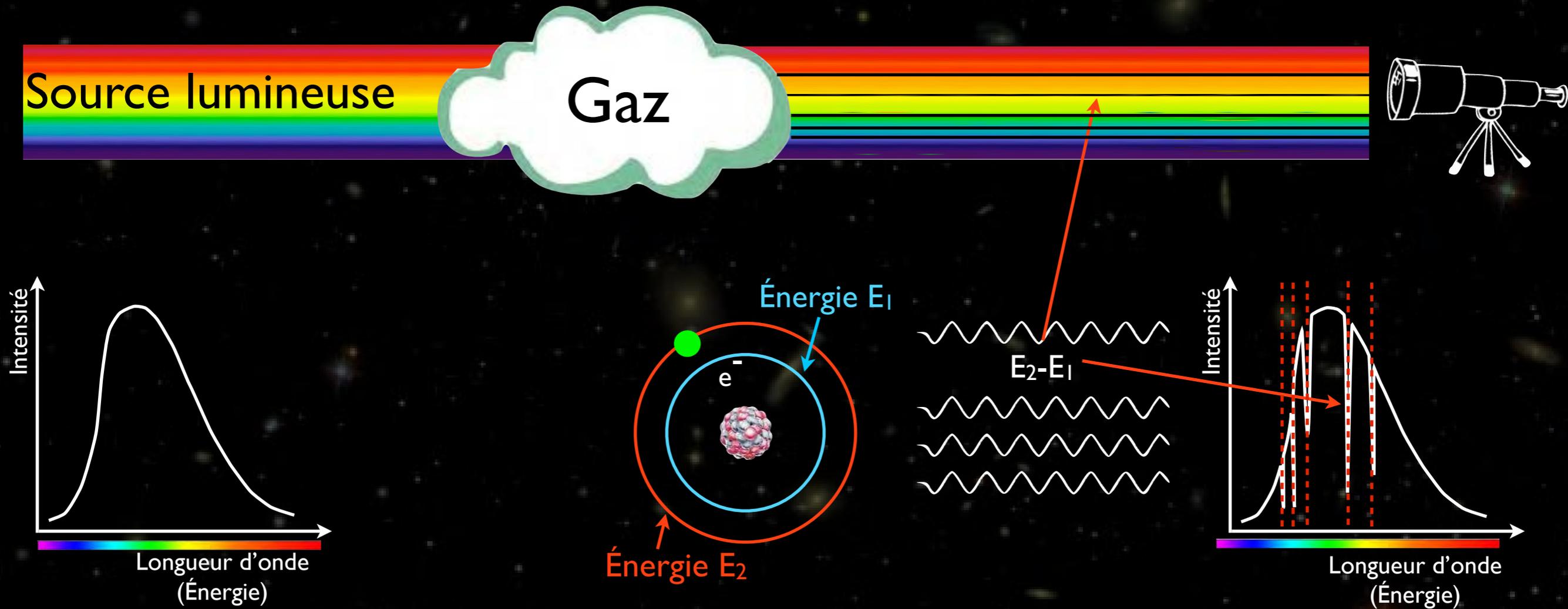


# Raies d'absorption/d'émission



- La position des raies noires correspond à des transitions observées en laboratoire du ou des gaz contenus dans le nuage.
- On sait les reconnaître (doublets, triplets, ...)
- Cela permet de déterminer la composition chimique des nuages/étoiles

# Raies d'absorption/d'émission



- La position des raies noires correspond à des transitions observées en laboratoire du ou des gaz contenus dans le nuage.
- On sait les reconnaître (doublets, triplets, ...)
- Cela permet de déterminer la composition chimique des nuages/étoiles

# L'Univers en expansion

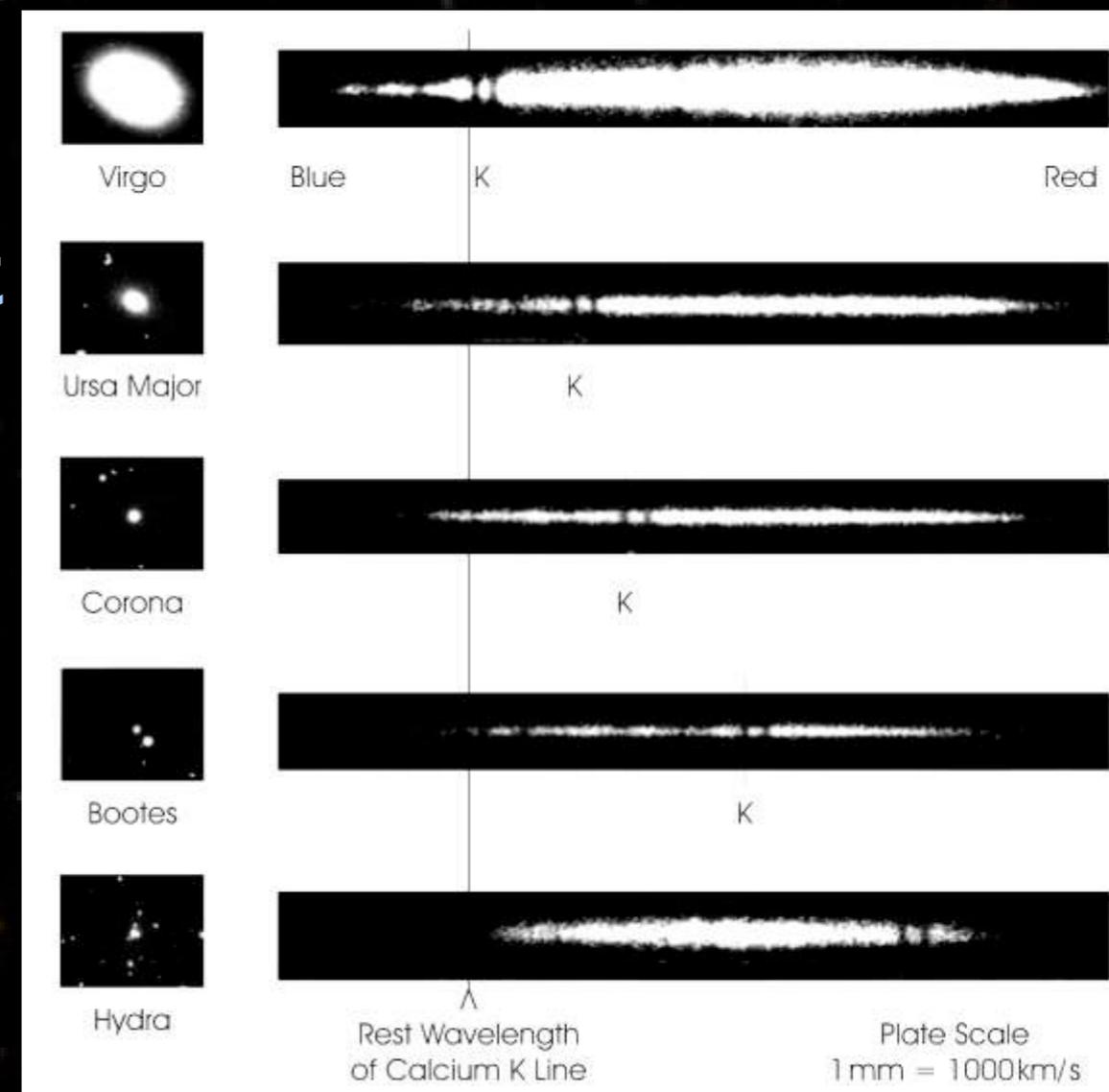


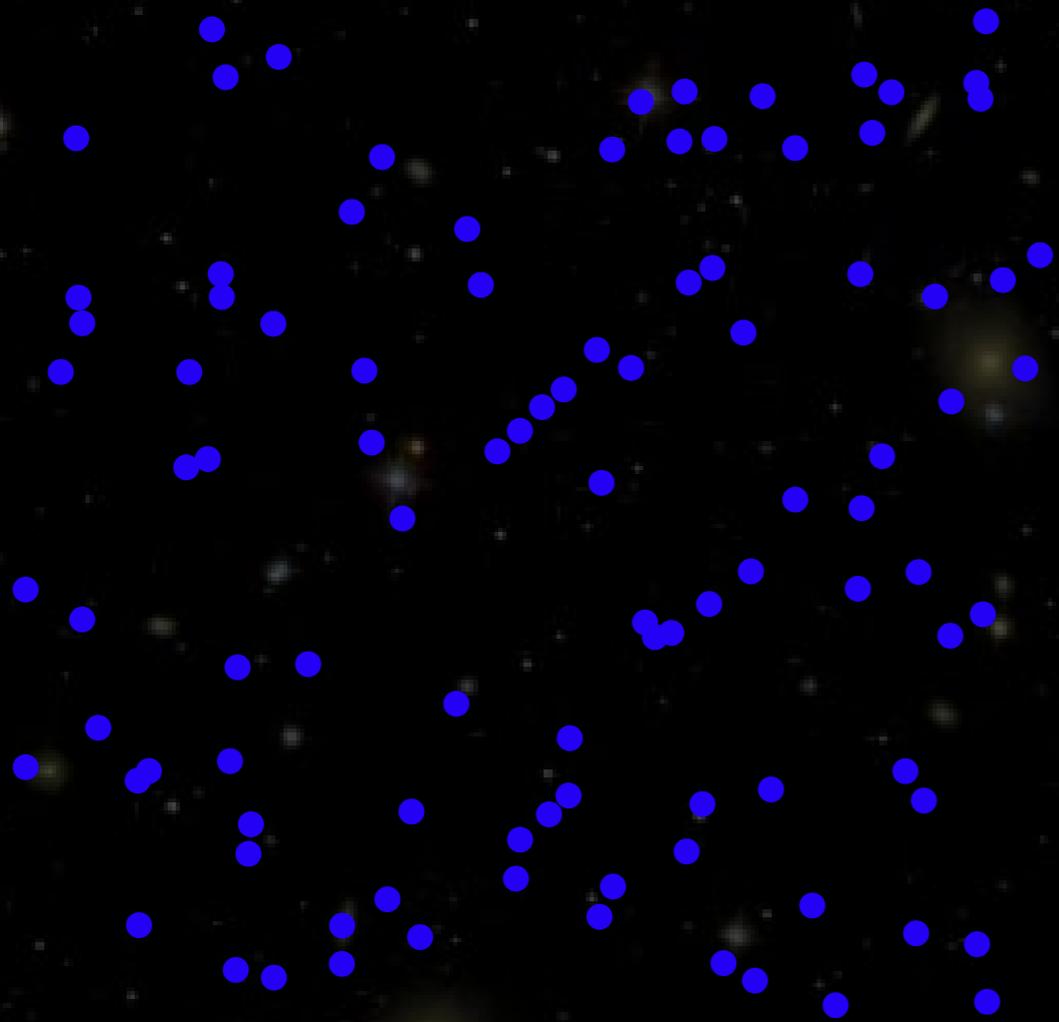
- Hubble observe les raies de galaxies (1929):
  - Le décalage vers le rouge des galaxies est proportionnel à leur distance

- 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

$$v = H_0 \times d$$



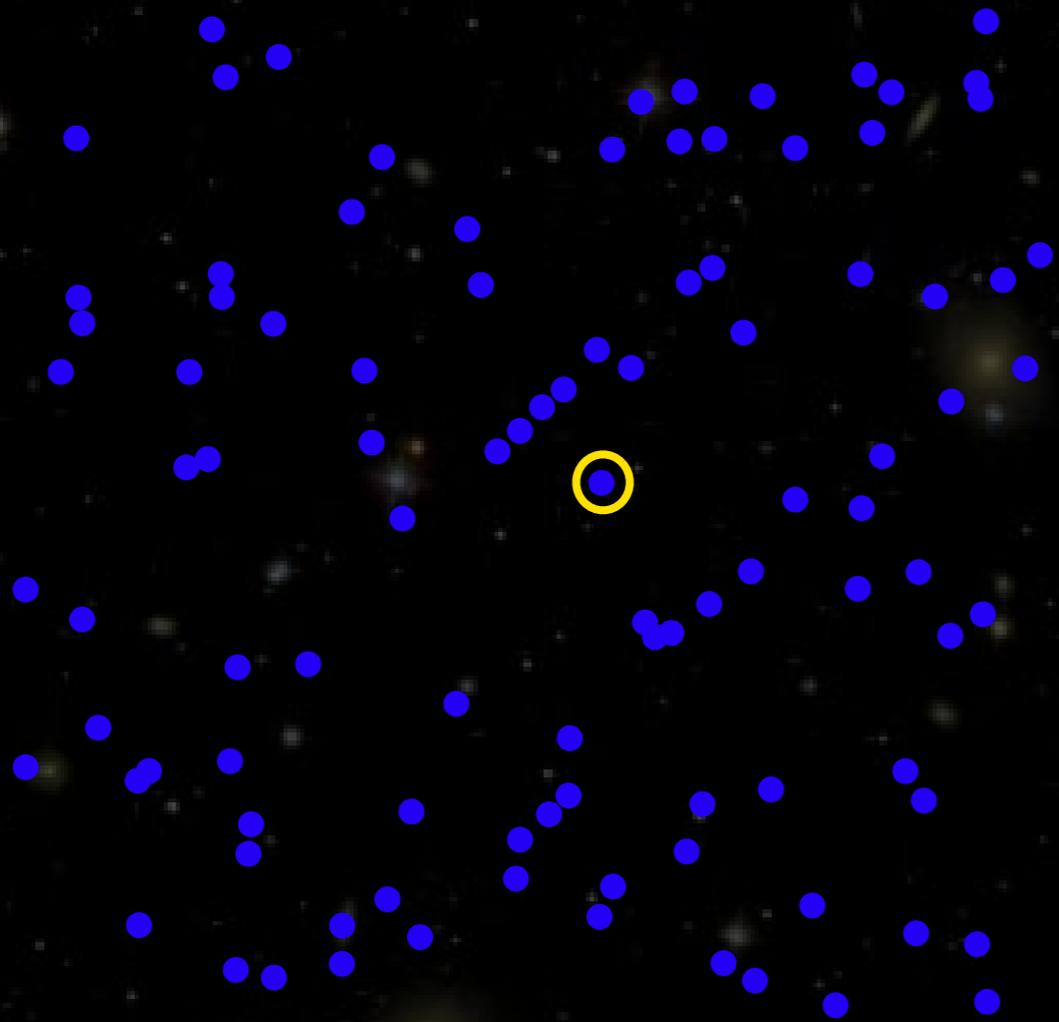


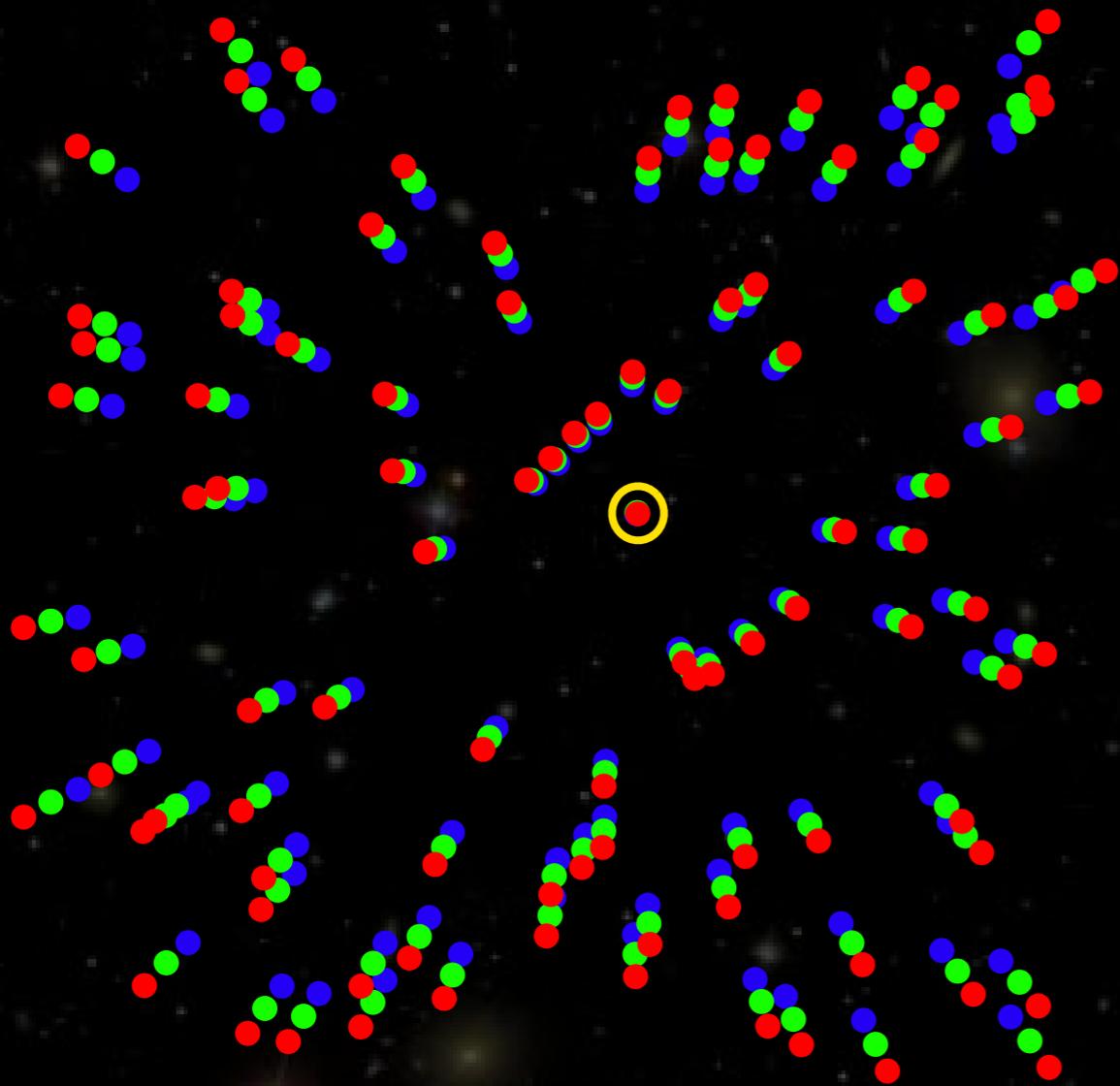
24/08/2015  
Montpellier

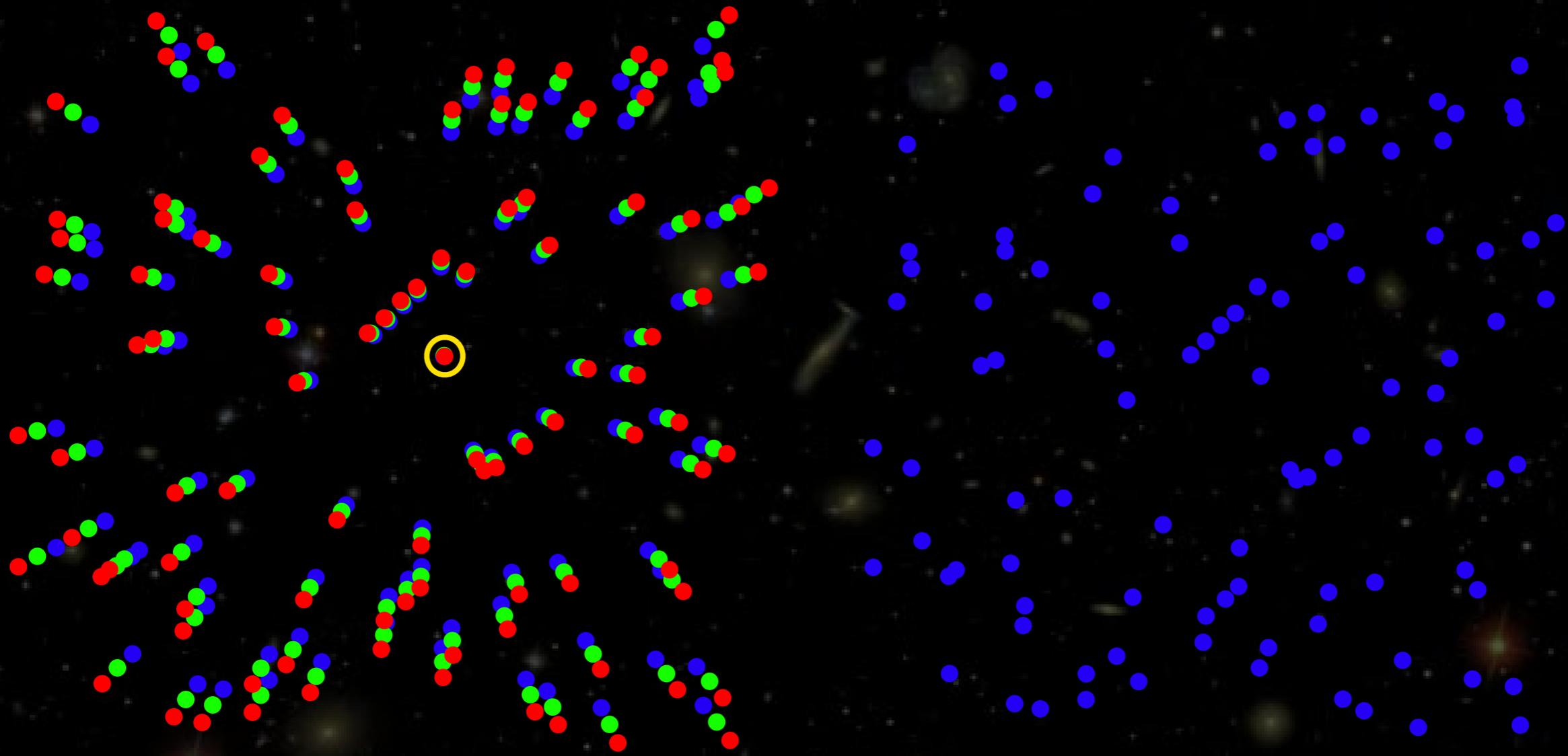


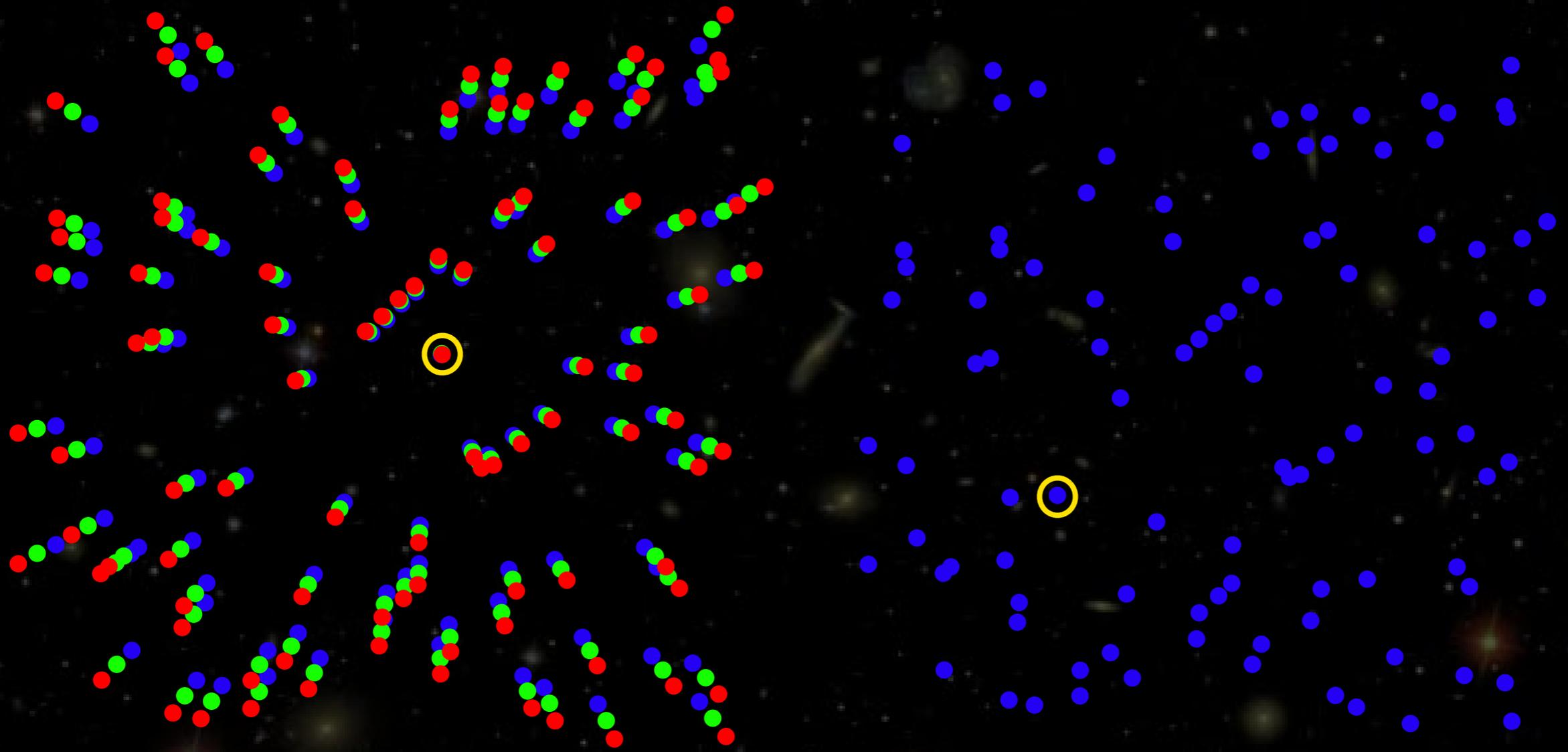
J.-Ch. Hamilton

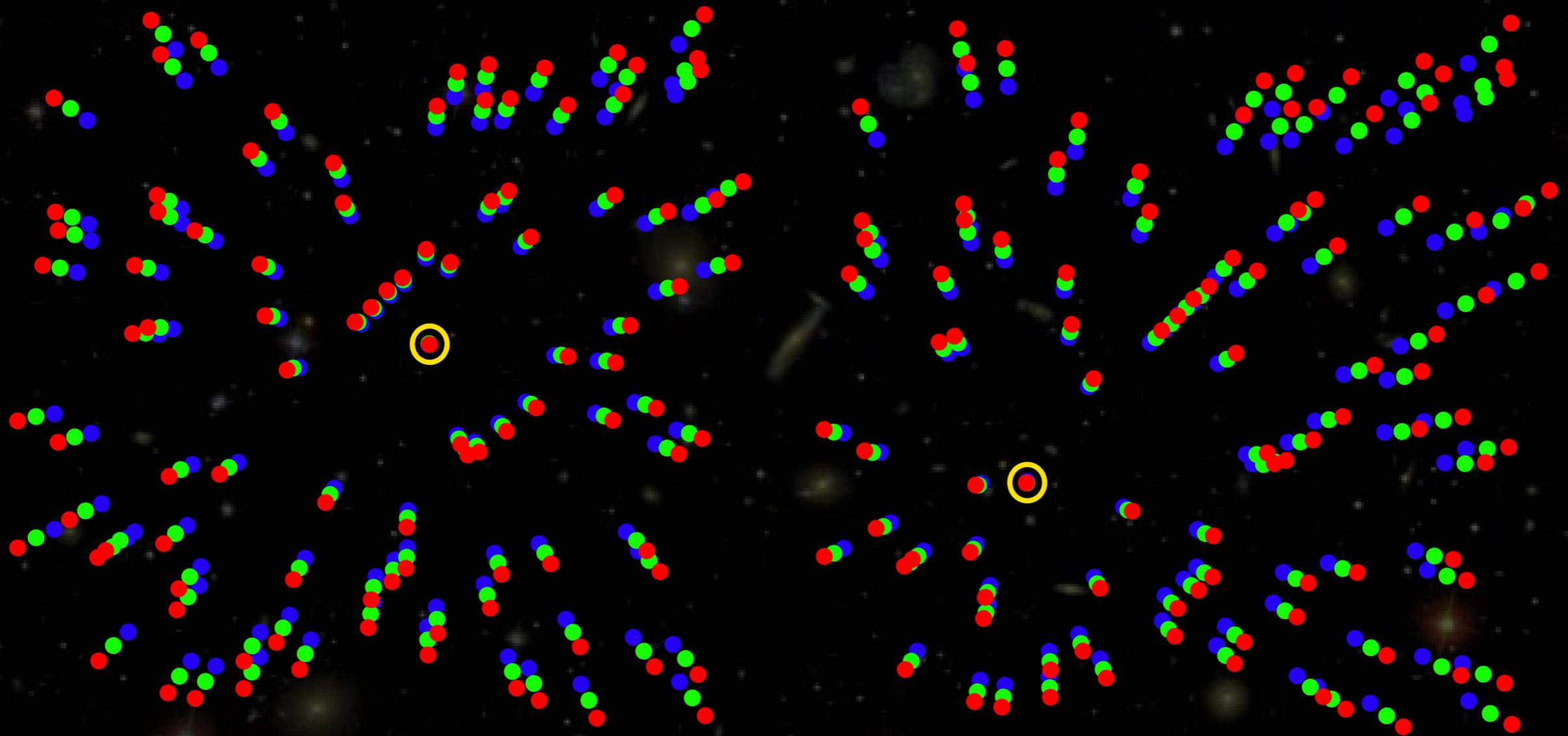




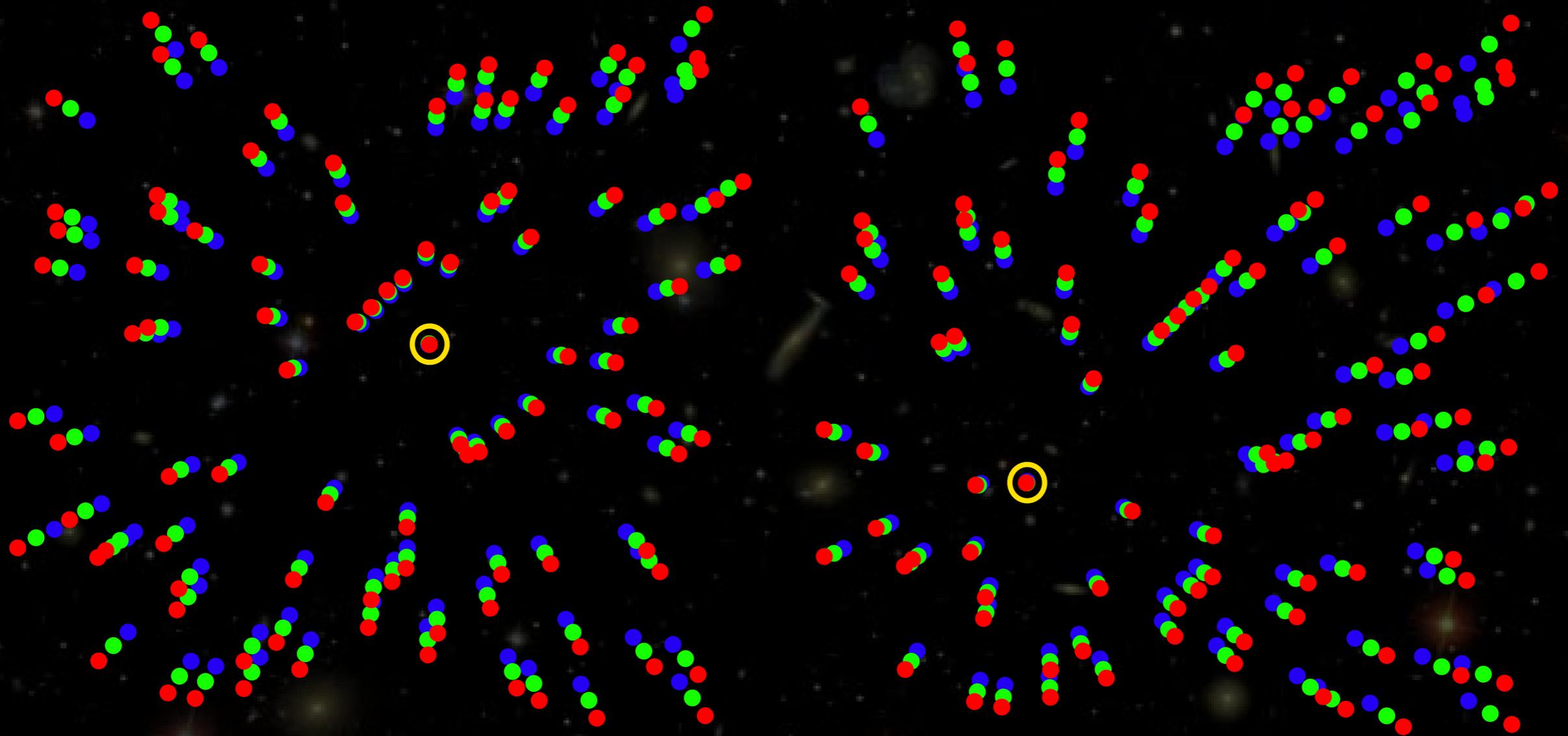








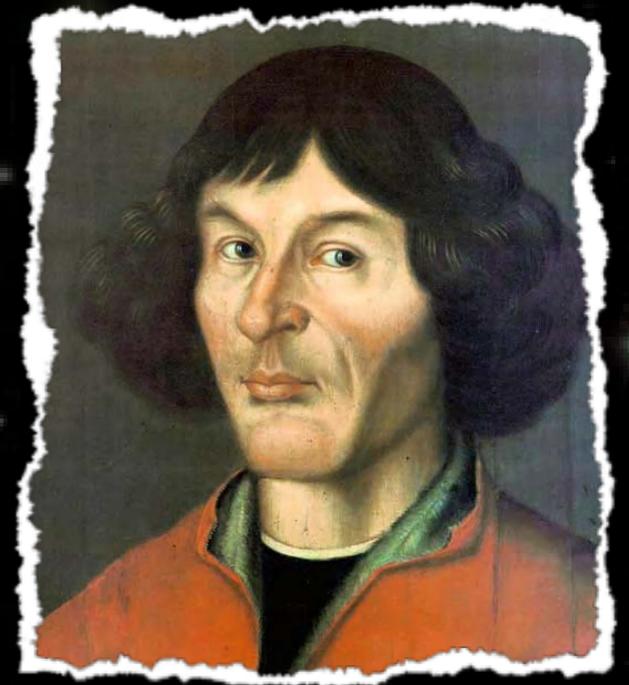
# L'expansion est globale



De partout en même temps ...

# Le principe cosmologique

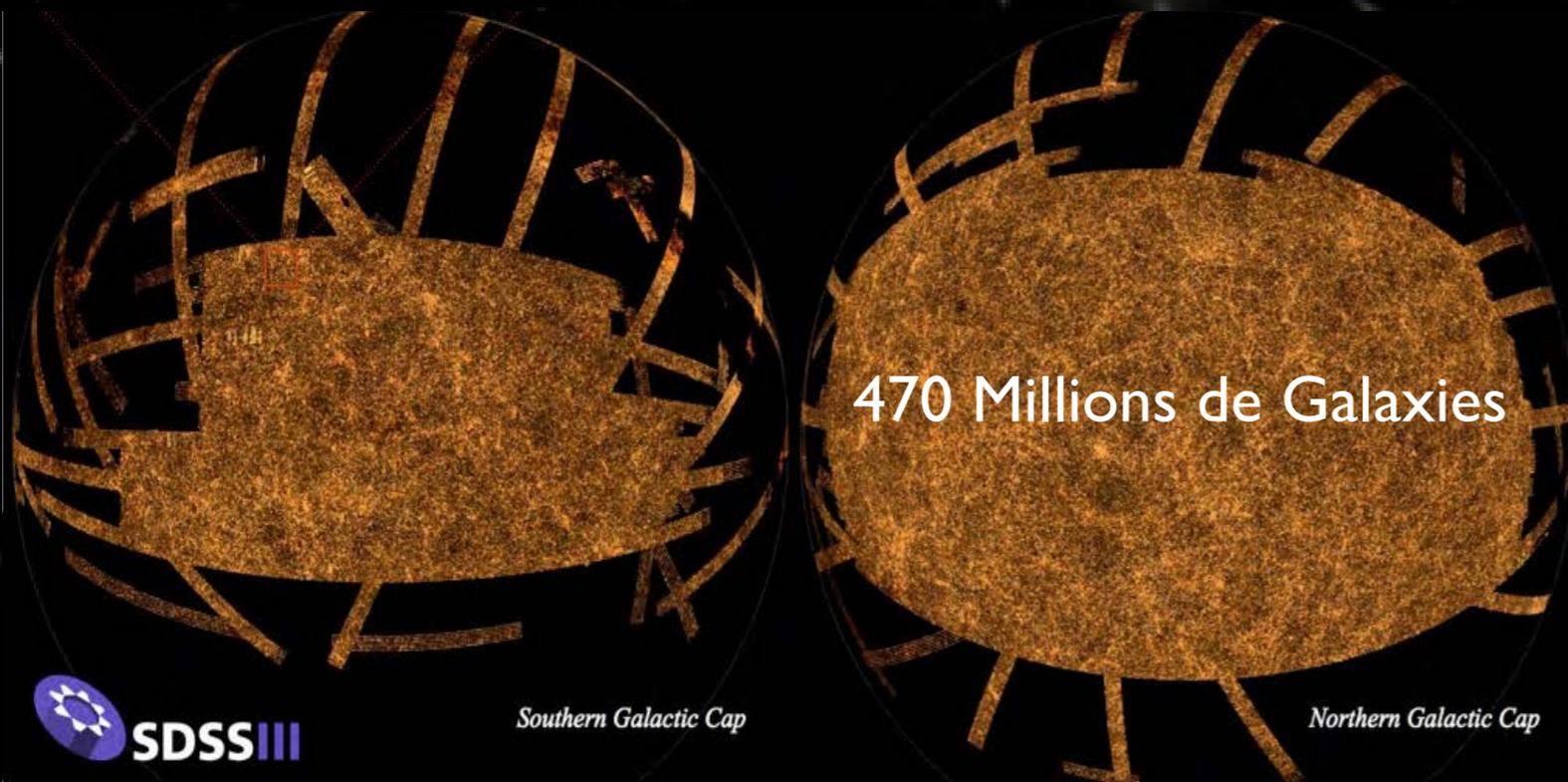
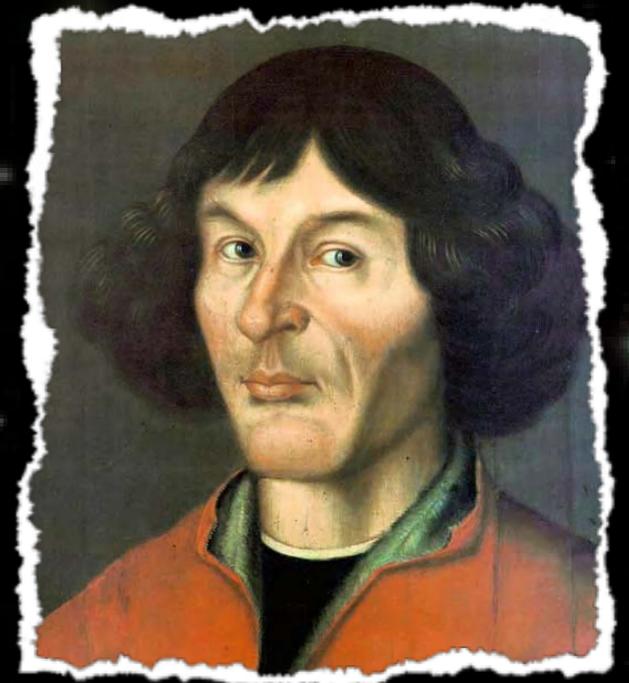
- Idée tirée du principe Copernicien
  - ★ La Terre n'est pas au centre du système solaire
- Extension à la cosmologie
  - ★ L'univers n'a pas de point de vue privilégié
  - ➔ il est isotrope



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

# Le principe cosmologique

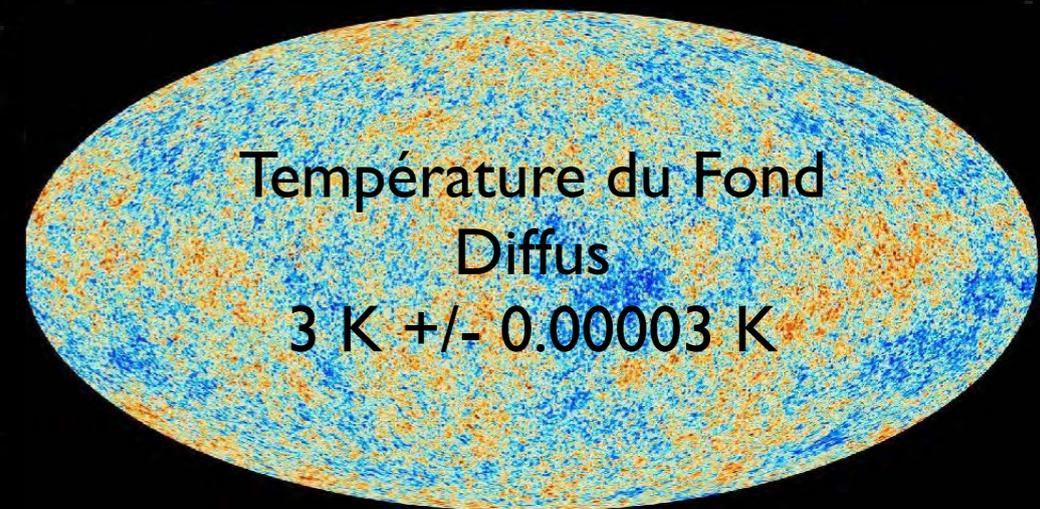
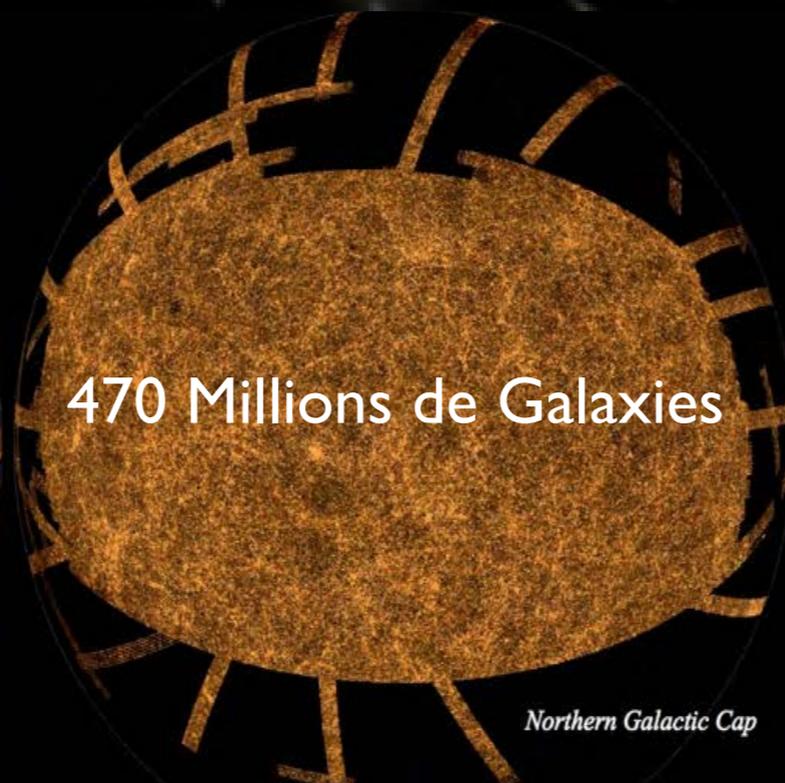
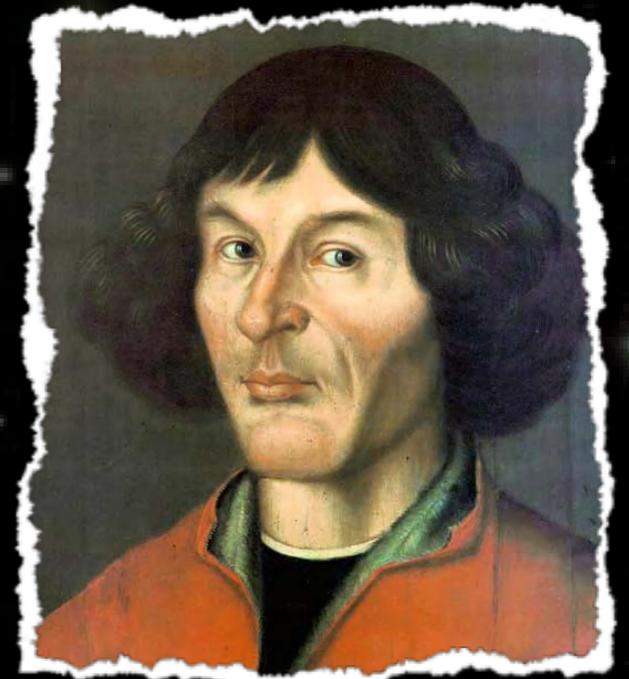
- Idée tirée du principe Copernicien
  - ★ La Terre n'est pas au centre du système solaire
- Extension à la cosmologie
  - ★ L'univers n'a pas de point de vue privilégié
  - ➔ il est isotrope



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

# 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



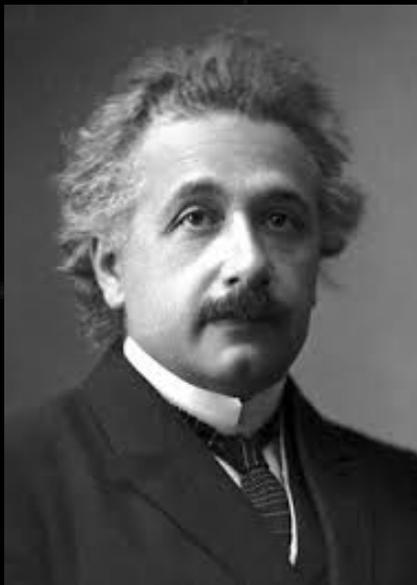
- «L'Univers est homogène et isotrope» (aux grandes échelles)

# Les piliers de la cosmologie

Relativité Générale

+

Principe  
cosmologique



Albert Einstein

# Les piliers de la cosmologie

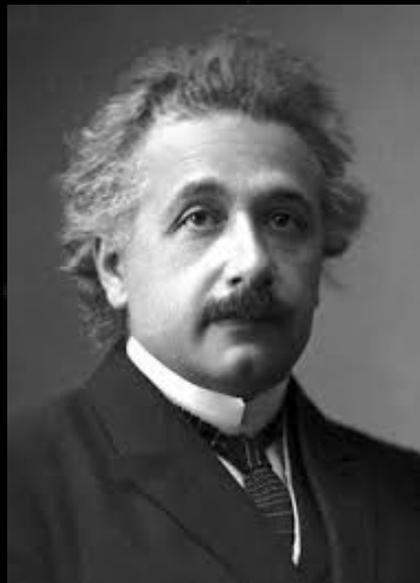
Relativité Générale

+

Principe  
cosmologique



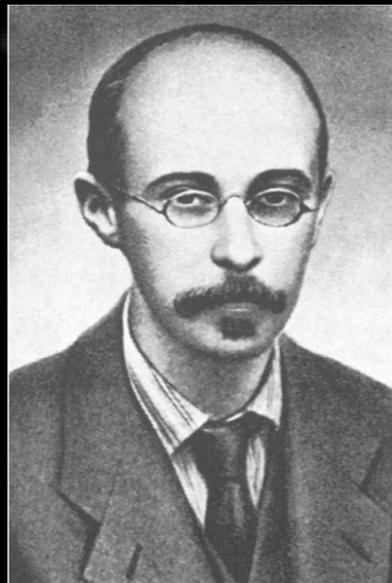
Univers dynamique  
Équations simples



Albert Einstein

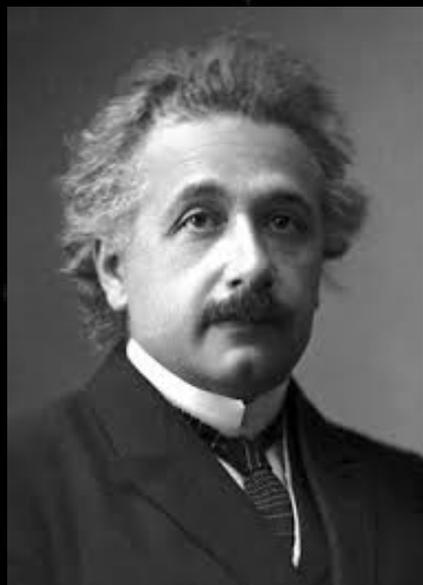
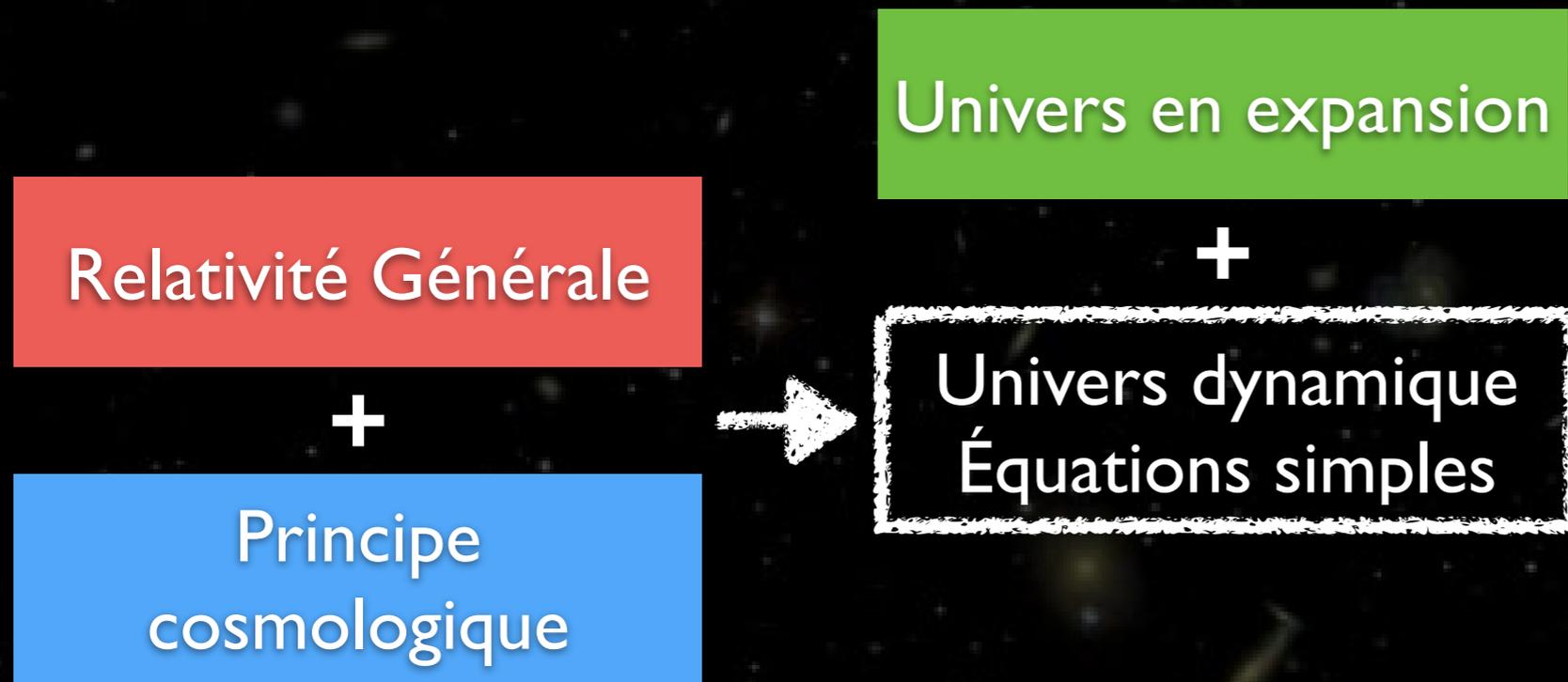


Georges Lemaître



Alexandre Friedman

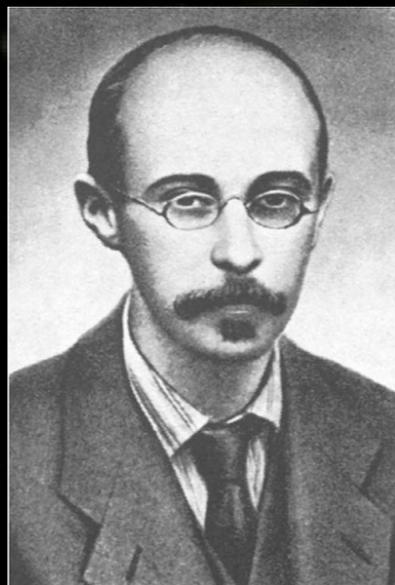
# Les piliers de la cosmologie



Albert Einstein



Georges Lemaître

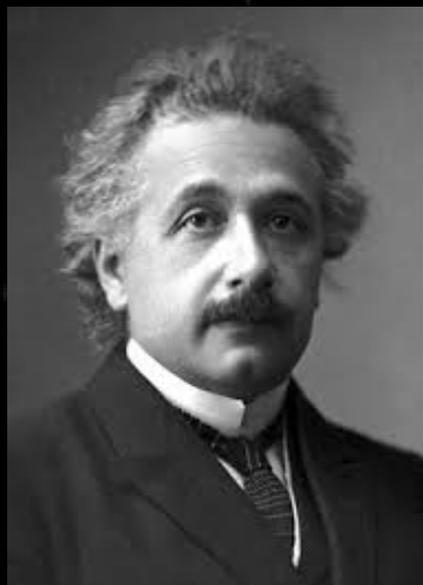
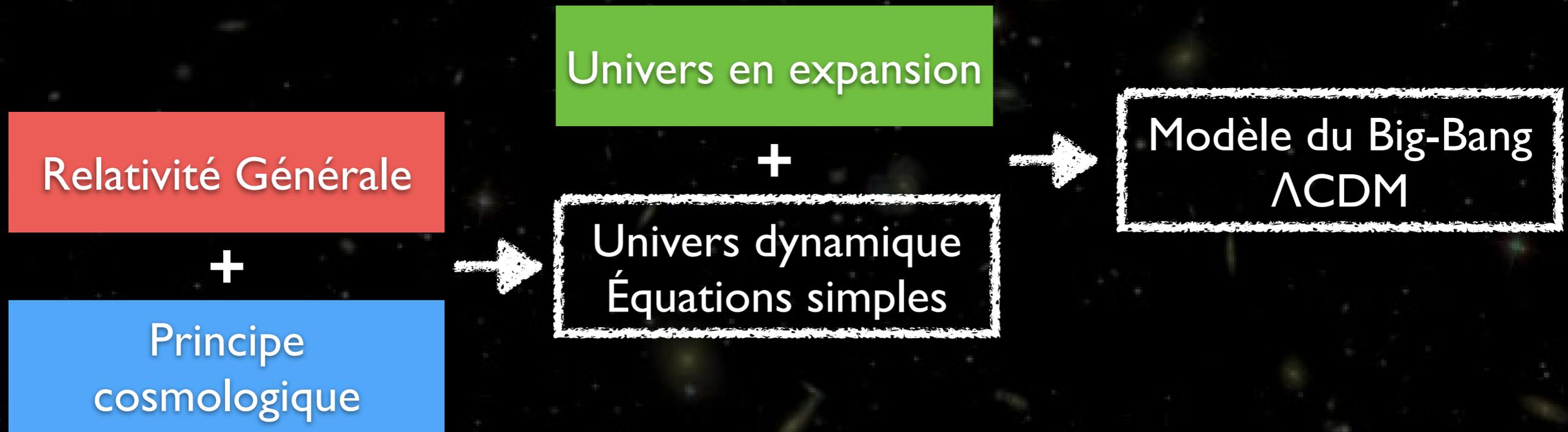


Alexandre Friedman



Edwin Hubble

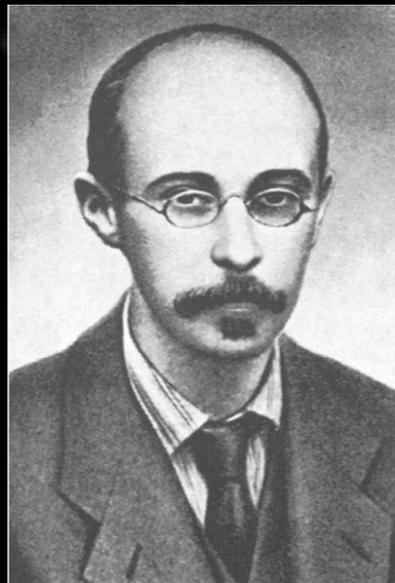
# Les piliers de la cosmologie



Albert Einstein



Georges Lemaître

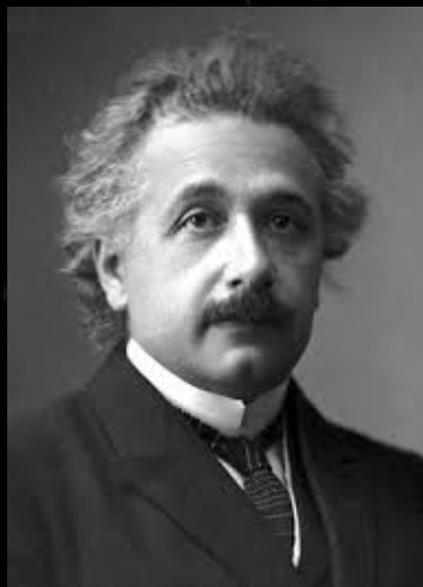
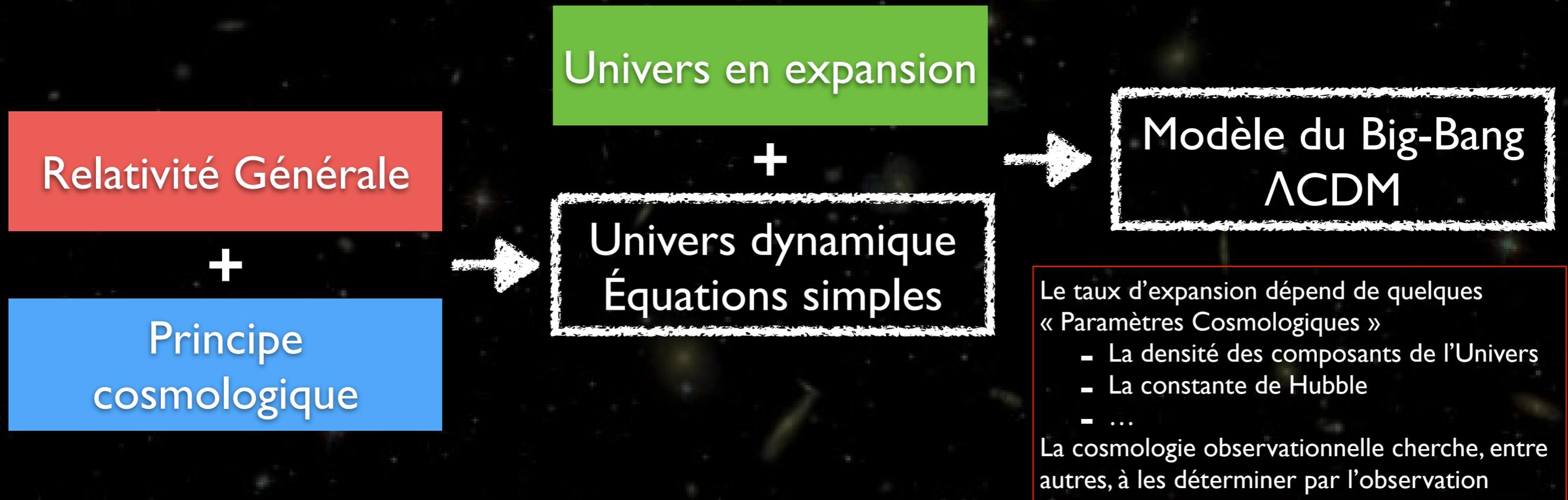


Alexandre Friedman



Edwin Hubble

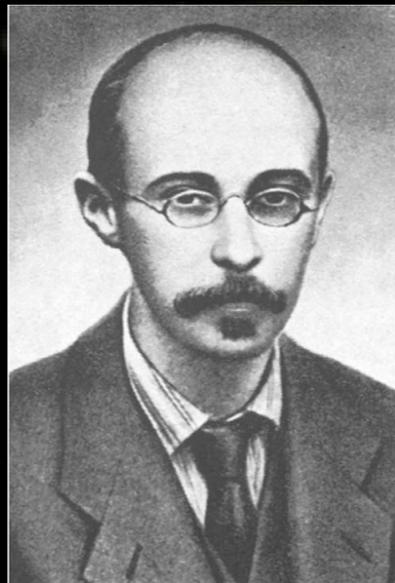
# Les piliers de la cosmologie



Albert Einstein



Georges Lemaître



Alexandre Friedman



Edwin Hubble

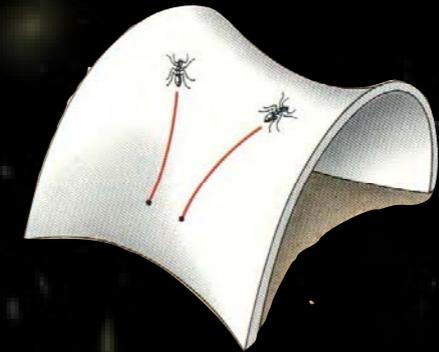


George Gamow

# Paramètres cosmologiques

- Courbure de l'Univers:  $\Omega_k$

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



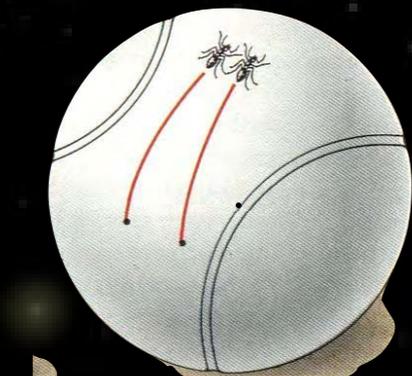
- Densité de matière:  $\Omega_m$

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



- Densité d'énergie sombre:  $\Omega_\Lambda$

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

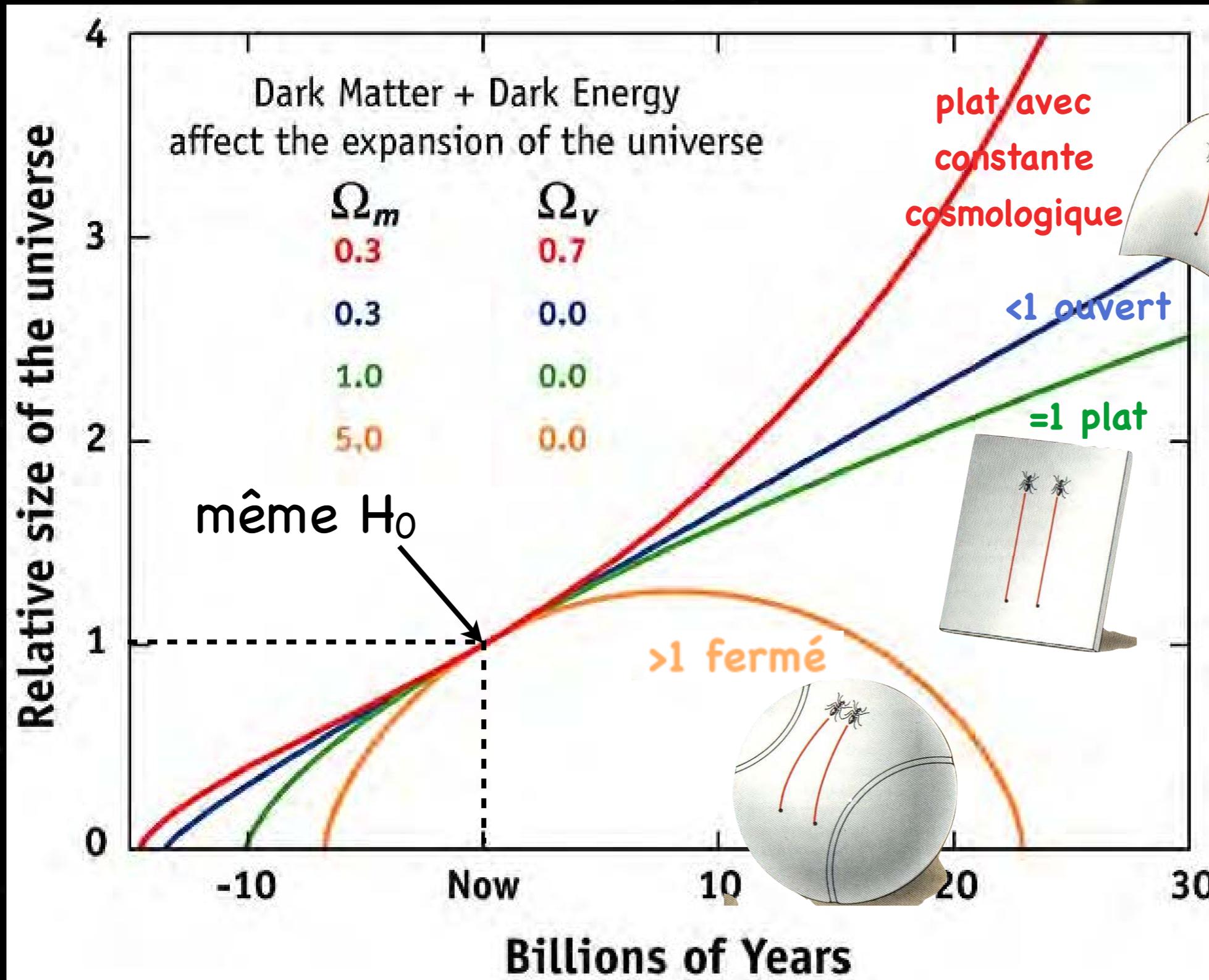


- Relation fondamentale:

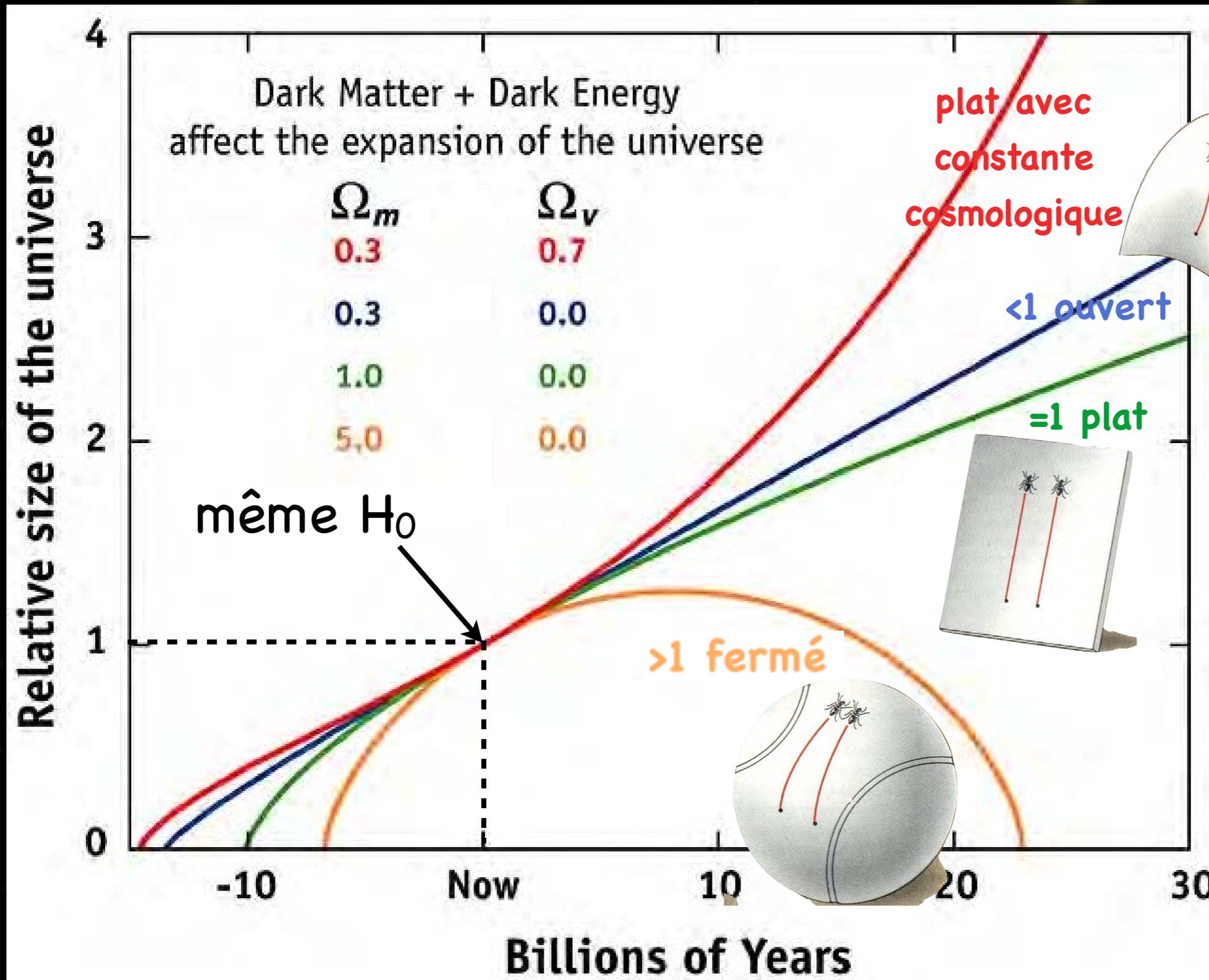
$$\Omega_k = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$$

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

# Évolution du facteur d'échelle



# Évolution du facteur d'échelle



Mesures actuelles  
Courbure ~nulle

- Énergie sombre
- Matière noire
- Matière baryonique



⇒  $\Lambda$ CDM

# L'instant du Big-Bang ?



24/08/2015  
Montpellier



J.-Ch. Hamilton



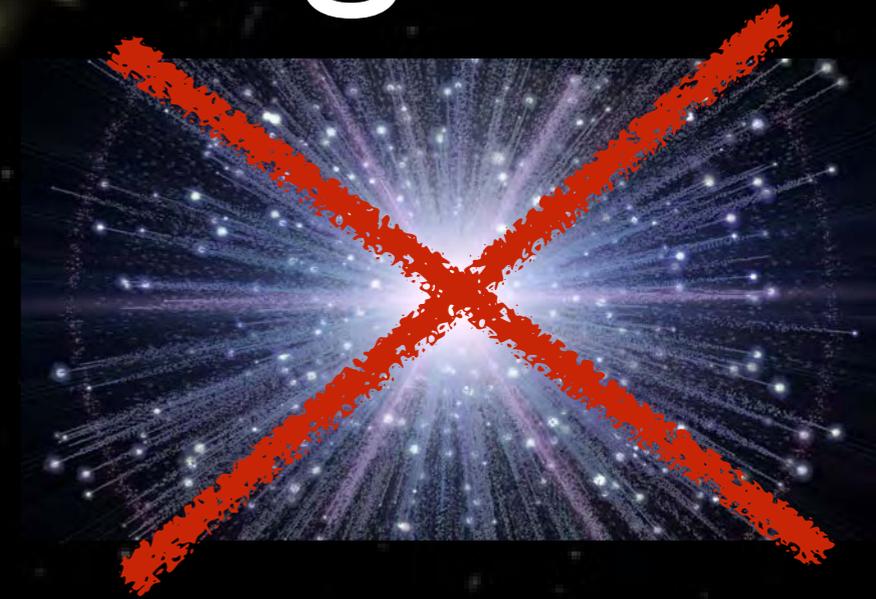
# L'instant du Big-Bang ?

- Le mot big-bang est TRÈS mal choisi
  - ★ Il suggère une explosion à partir d'un point
  - ★ C'est inexact (dans le cas général):
    - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
    - Si explosion il y a eu, alors elle à eu lieu partout en même temps



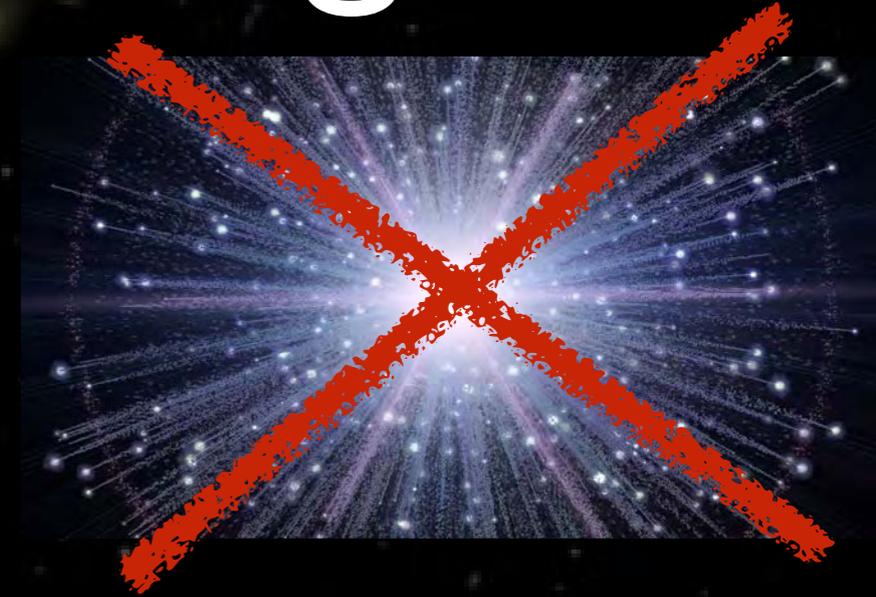
# L'instant du Big-Bang ?

- Le mot big-bang est TRÈS mal choisi
  - ★ Il suggère une explosion à partir d'un point
  - ★ C'est inexact (dans le cas général):
    - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
    - Si explosion il y a eu, alors elle à eu lieu partout en même temps



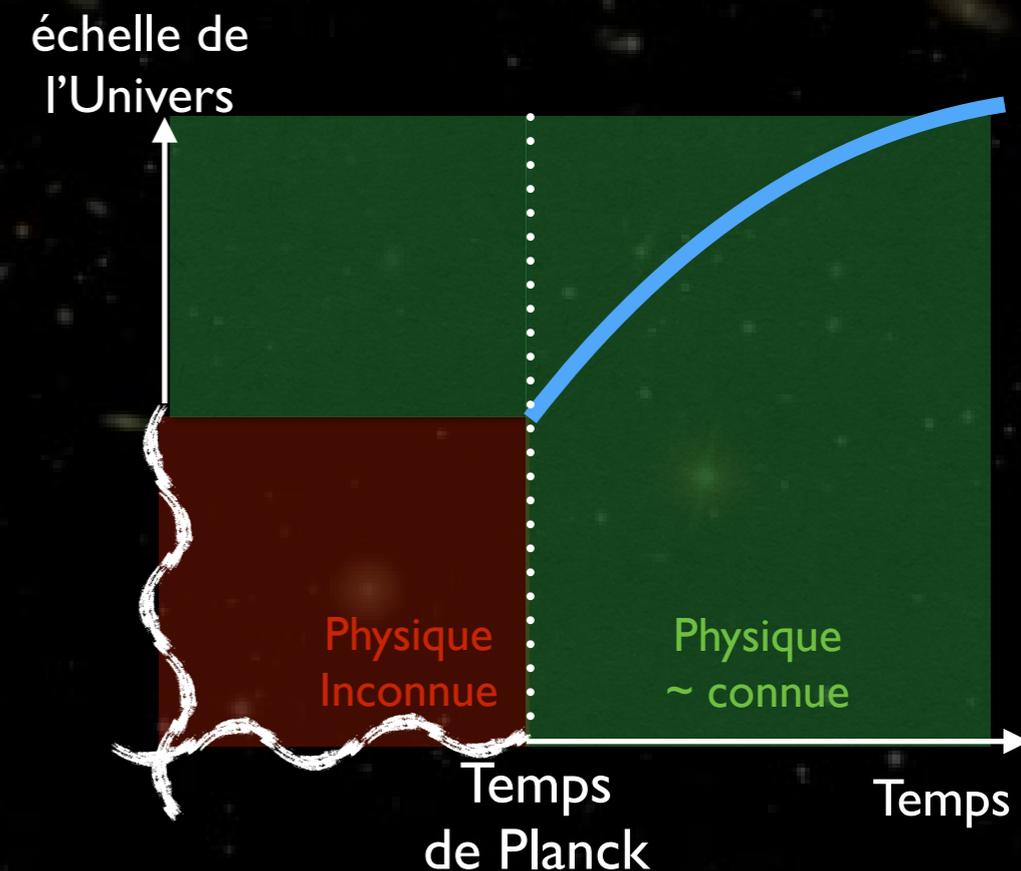
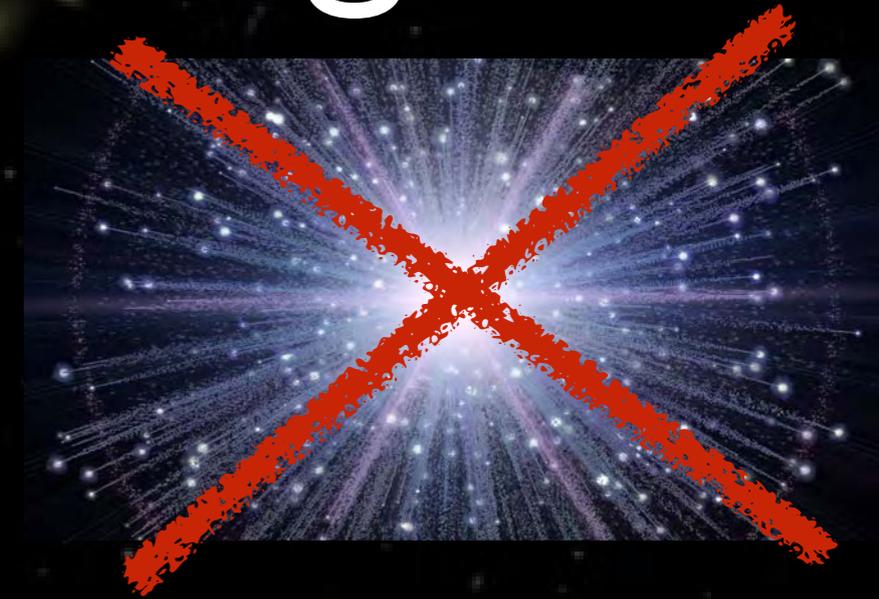
# L'instant du Big-Bang ?

- Le mot big-bang est TRÈS mal choisi
  - ★ Il suggère une explosion à partir d'un point
  - ★ C'est inexact (dans le cas général):
    - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
    - Si explosion il y a eu, alors elle à eu 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 sont faibles
    - c'est à dire pour  $t < t_{\text{planck}} (\sim 10^{-44} \text{ sec})$
  - ★ Le temps et l'espace ne sont bien définis qu'après  $t = 10^{-44} \text{ sec}$ 
    - pas d'avant...
  - ★ Quand on aura une théorie quantique de la gravitation, on pourra en parler, pour l'heure ce ne sont que spéculations...



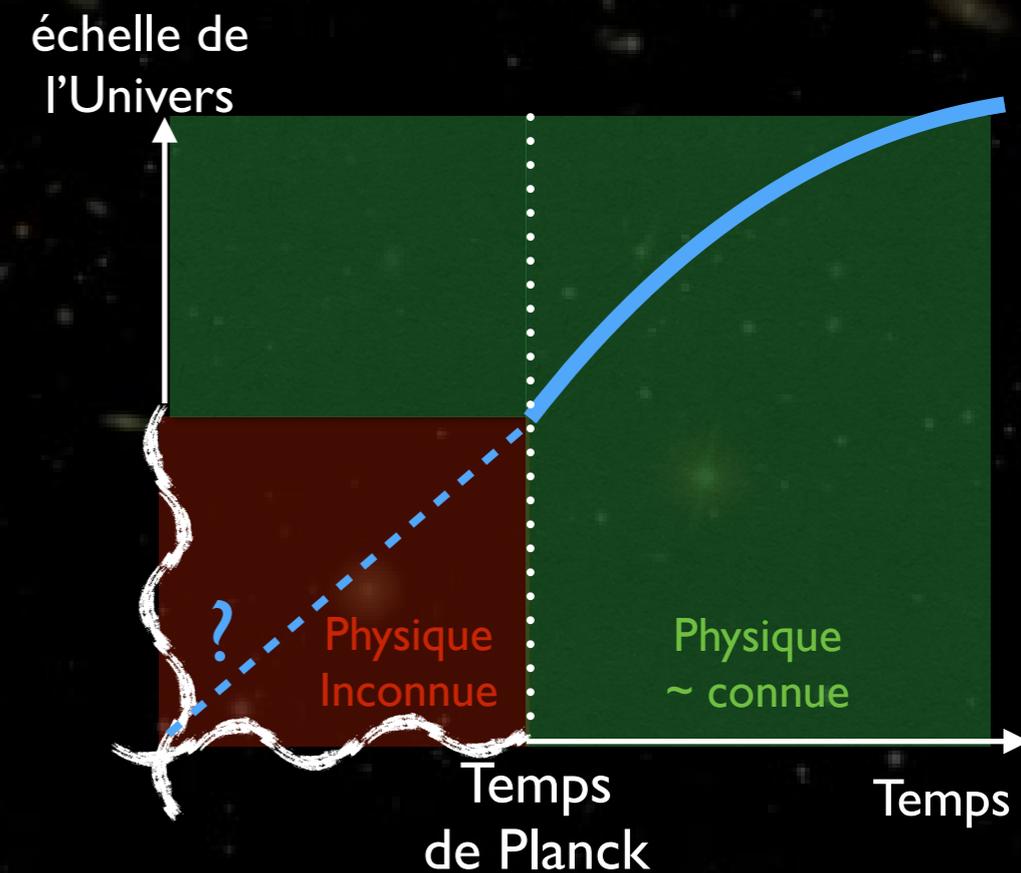
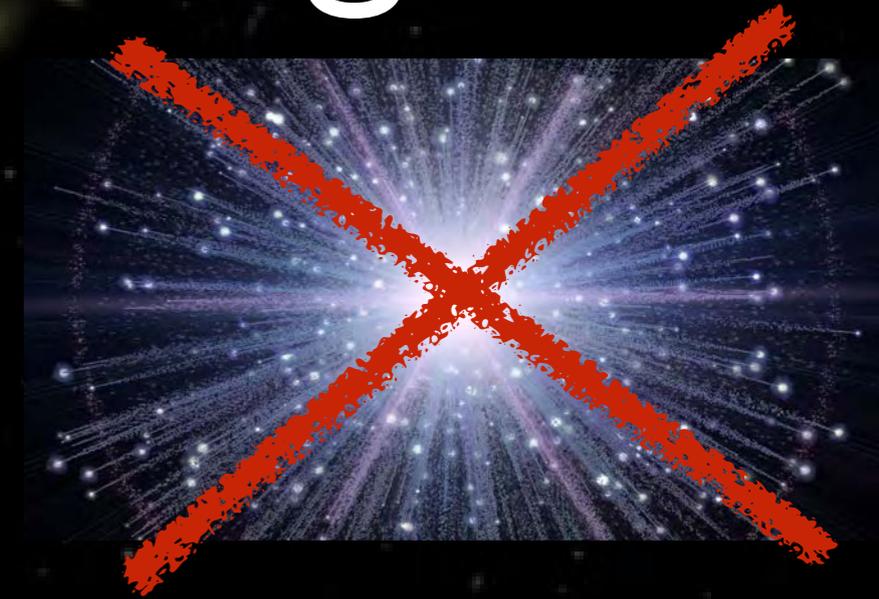
# L'instant du Big-Bang ?

- Le mot big-bang est TRÈS mal choisi
  - ★ Il suggère une explosion à partir d'un point
  - ★ C'est inexact (dans le cas général):
    - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
    - Si explosion il y a eu, alors elle à eu 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 sont faibles
    - c'est à dire pour  $t < t_{\text{planck}} (\sim 10^{-44} \text{ sec})$
  - ★ Le temps et l'espace ne sont bien définis qu'après  $t = 10^{-44} \text{ sec}$ 
    - pas d'avant...
  - ★ Quand on aura une théorie quantique de la gravitation, on pourra en parler, pour l'heure ce ne sont que spéculations...



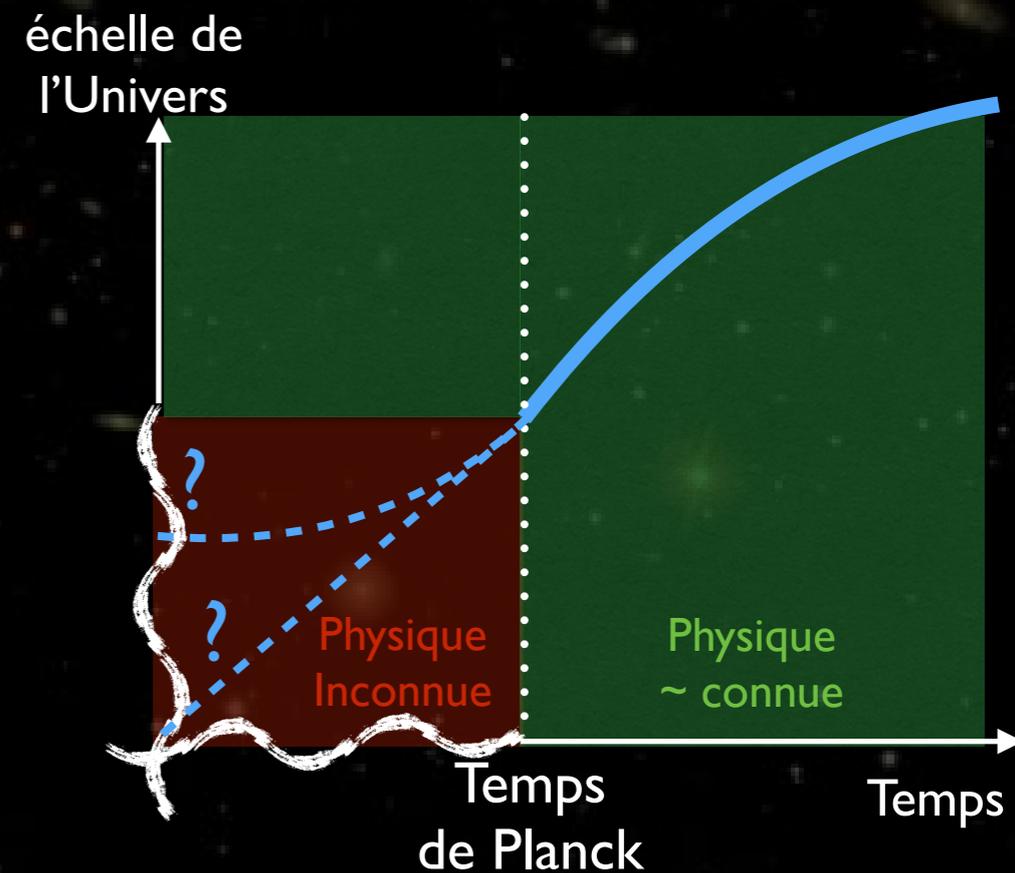
# L'instant du Big-Bang ?

- Le mot big-bang est TRÈS mal choisi
  - ★ Il suggère une explosion à partir d'un point
  - ★ C'est inexact (dans le cas général):
    - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
    - Si explosion il y a eu, alors elle à eu 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 sont faibles
    - c'est à dire pour  $t < t_{\text{planck}} (\sim 10^{-44} \text{ sec})$
  - ★ Le temps et l'espace ne sont bien définis qu'après  $t = 10^{-44} \text{ sec}$ 
    - pas d'avant...
  - ★ Quand on aura une théorie quantique de la gravitation, on pourra en parler, pour l'heure ce ne sont que spéculations...



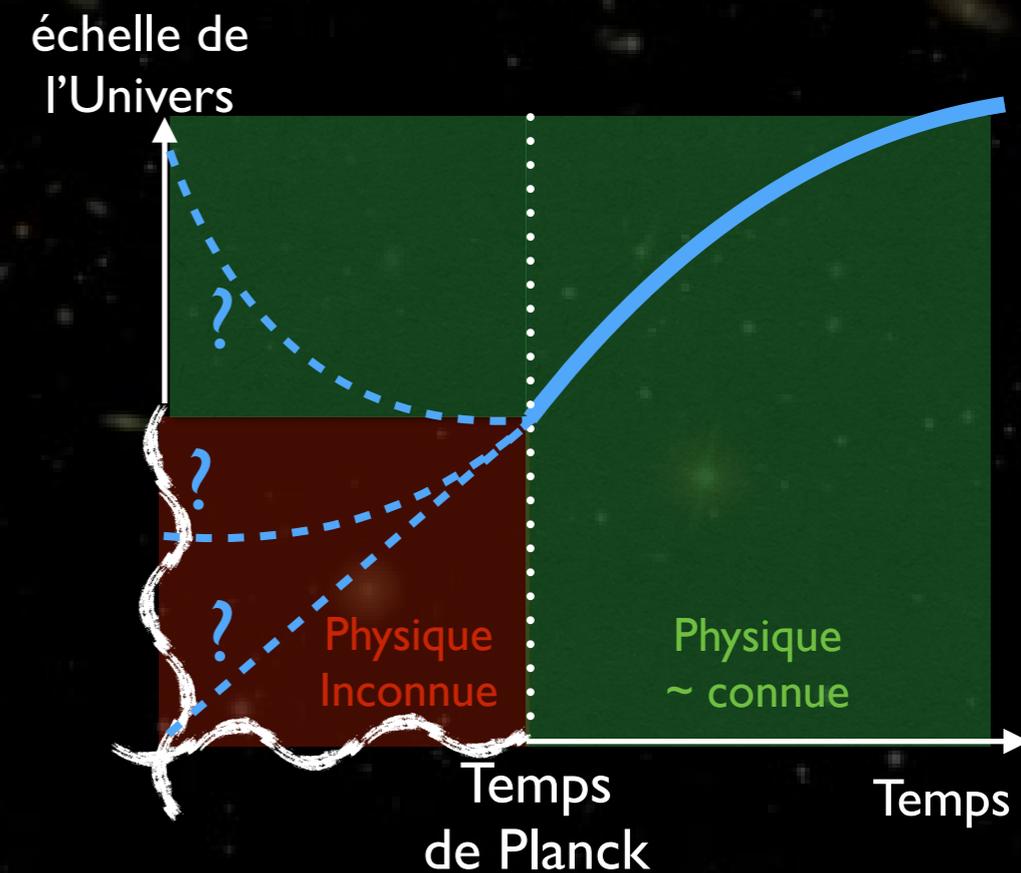
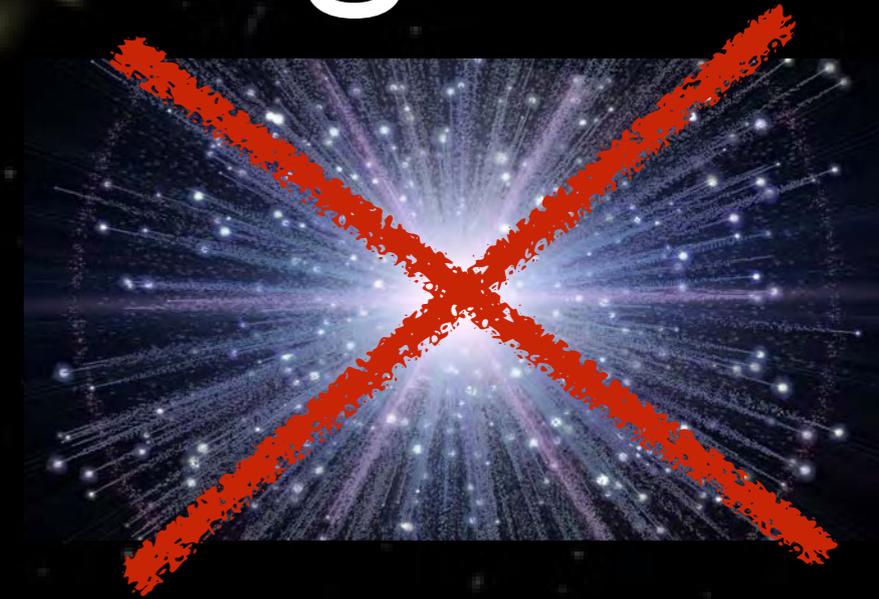
# L'instant du Big-Bang ?

- Le mot big-bang est TRÈS mal choisi
  - ★ Il suggère une explosion à partir d'un point
  - ★ C'est inexact (dans le cas général):
    - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
    - Si explosion il y a eu, alors elle à eu 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 sont faibles
    - c'est à dire pour  $t < t_{\text{planck}} (\sim 10^{-44} \text{ sec})$
  - ★ Le temps et l'espace ne sont bien définis qu'après  $t = 10^{-44} \text{ sec}$ 
    - pas d'avant...
  - ★ Quand on aura une théorie quantique de la gravitation, on pourra en parler, pour l'heure ce ne sont que spéculations...



# 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 (dans le cas général):
    - si l'Univers est infini (plat ou ouvert) alors il l'a toujours été
    - Si explosion il y a eu, alors elle à eu 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 sont faibles
    - c'est à dire pour  $t < t_{\text{planck}} (\sim 10^{-44} \text{ sec})$
  - ★ Le temps et l'espace ne sont bien définis qu'après  $t = 10^{-44} \text{ sec}$ 
    - pas d'avant...
  - ★ Quand on aura une théorie quantique de la gravitation, on pourra en parler, pour l'heure ce ne sont que spéculations...



# Au menu:

- Les échelles de l'Univers
  - ★ L'Univers c'est très vaste...
- Les piliers de la cosmologie et le modèle du Big-Bang
  - ★ La Relativité Générale
  - ★ L'expansion de l'Univers
  - ★ L'Univers semble globalement homogène et isotrope
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
  - ★ La matière noire
  - ★ L'énergie sombre
  - ★ Le fond diffus cosmologique (CMB - rayonnement à 3K)



9 avis | N° 34 sur 100 choses à voir/à faire à Montpellier



24/08/2015  
Montpellier



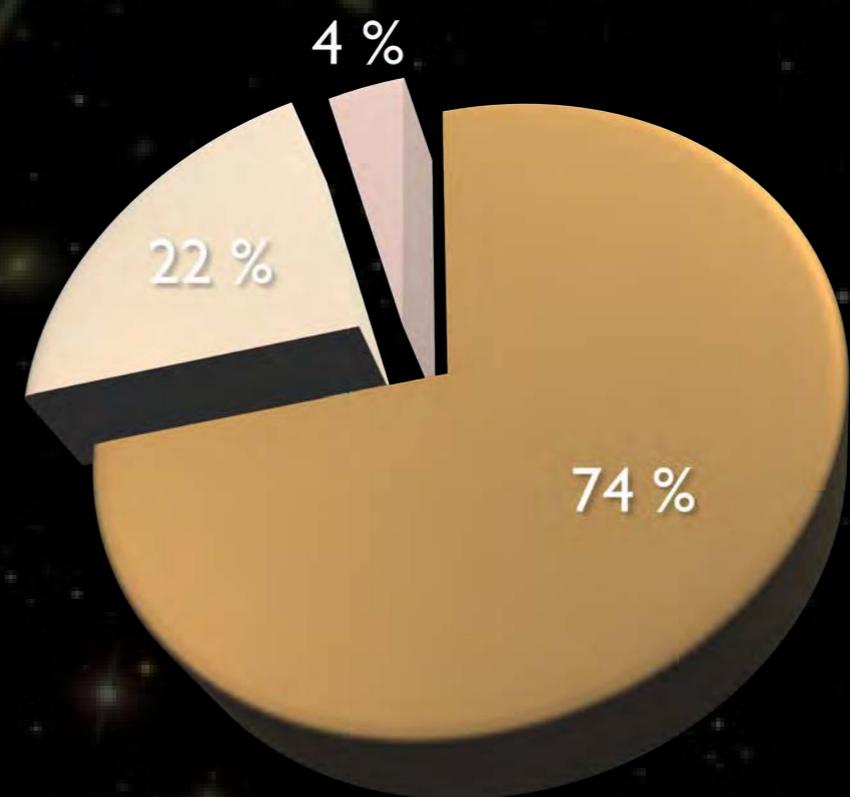
J.-Ch. Hamilton





9 avis | N° 34 sur 100 choses à voir/à faire à Montpellier

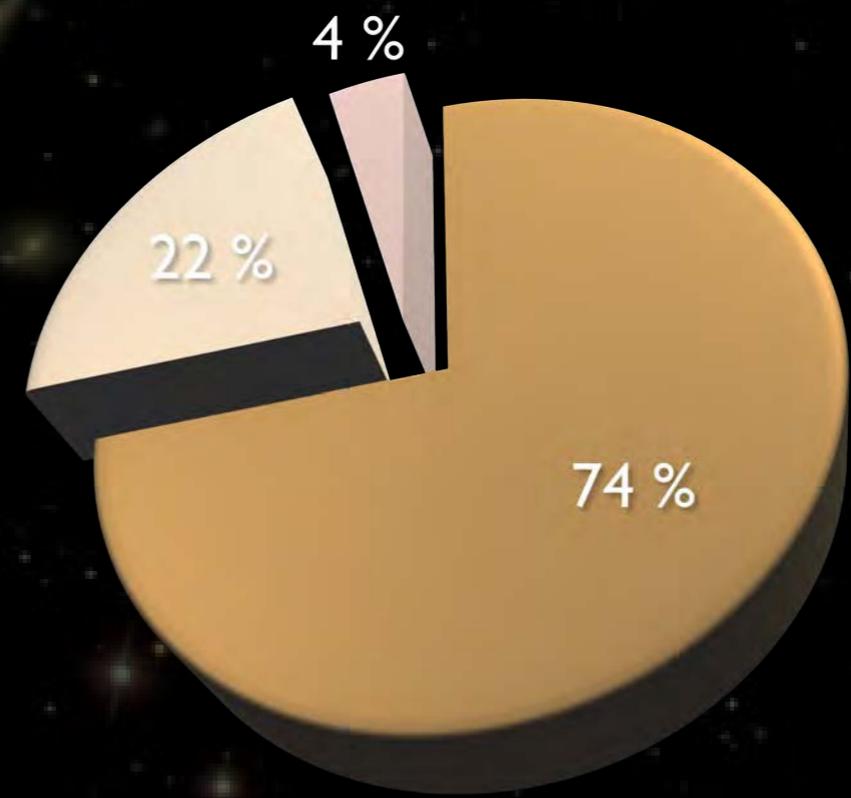
- Énergie sombre
- Matière noire
- Matière « normale » (baryonique)





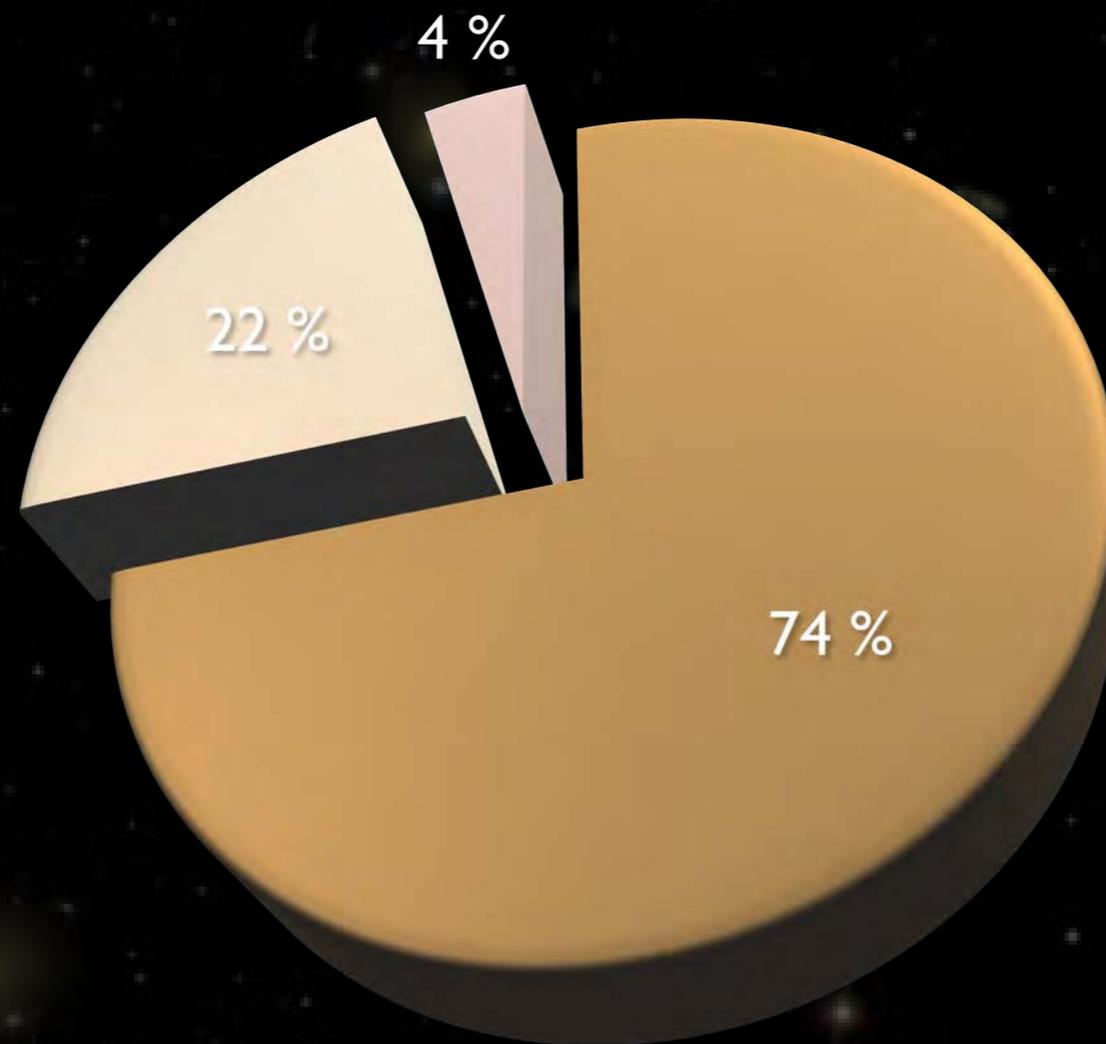
9 avis | N° 34 sur 100 choses à voir/à faire à Montpellier

- Incompréhensible, aucun modèle satisfaisant, bien mesurée
- Introuvable, plein de modèles possibles, bien mesurée
- Bien connue



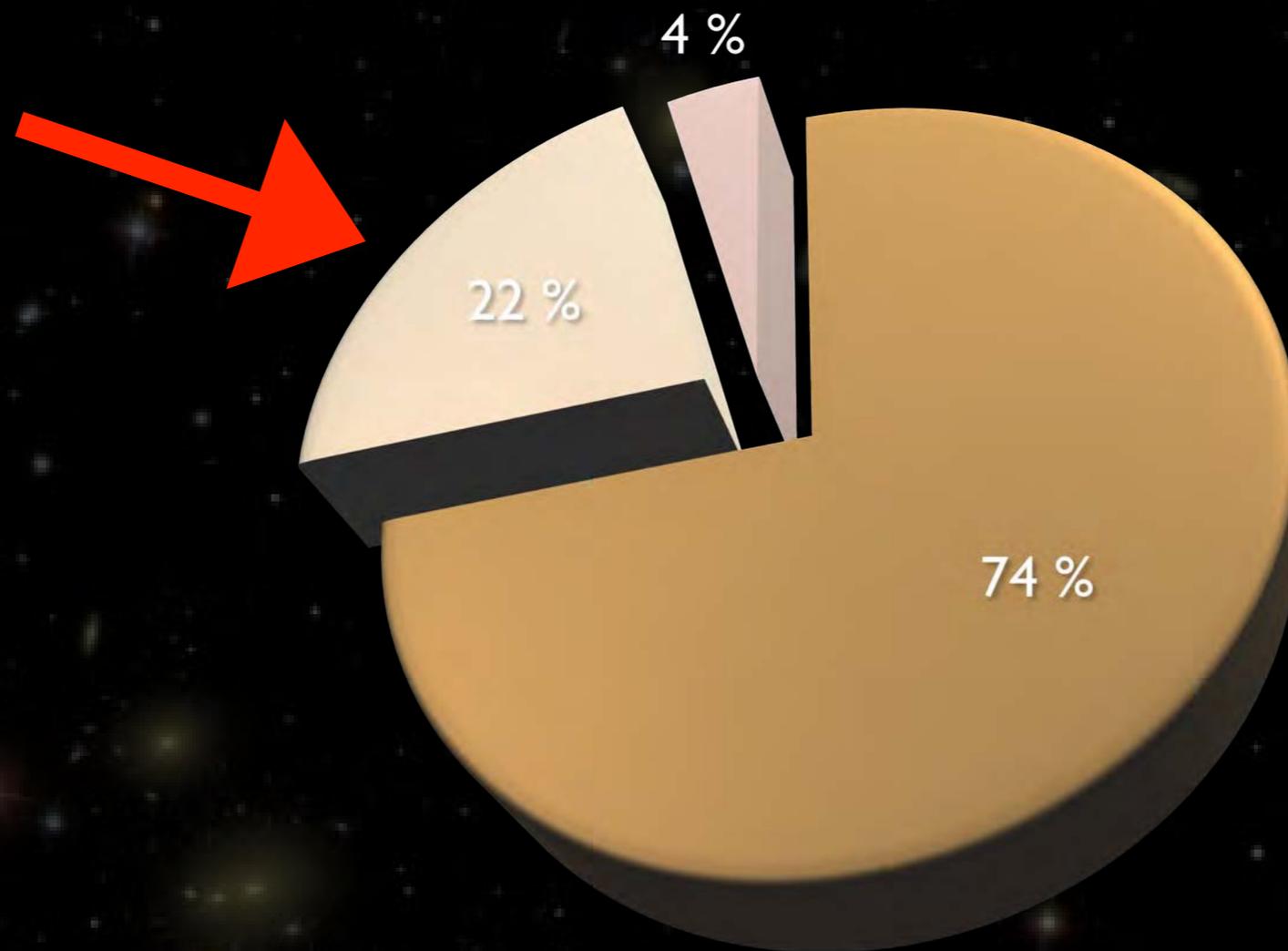
# Matière noire ?

● Énergie sombre ● Matière noire ● Matière « normale » (baryonique)

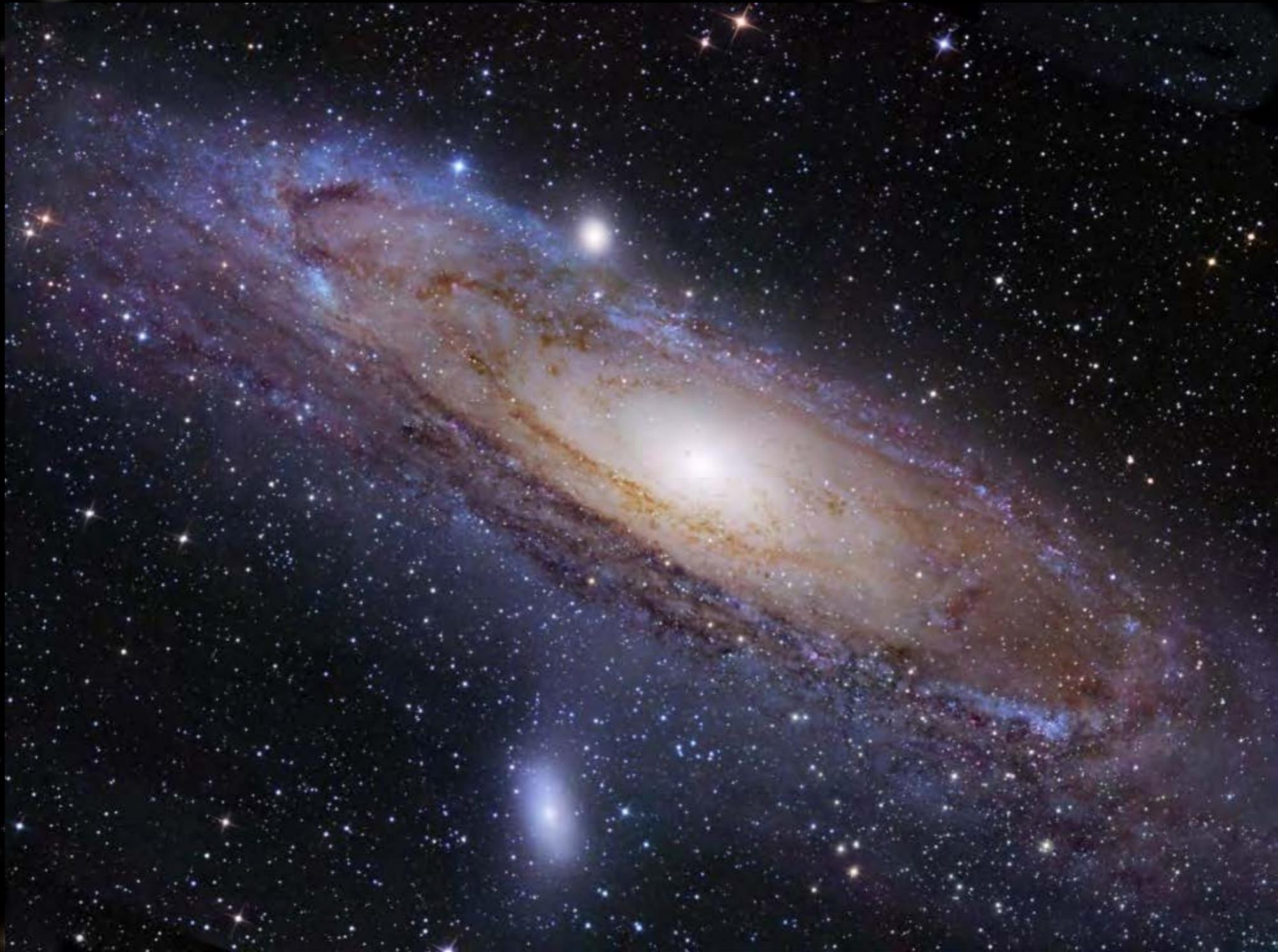


# Matière noire ?

● Énergie sombre ● Matière noire ● Matière « normale » (baryonique)



# Matière noire Galactique



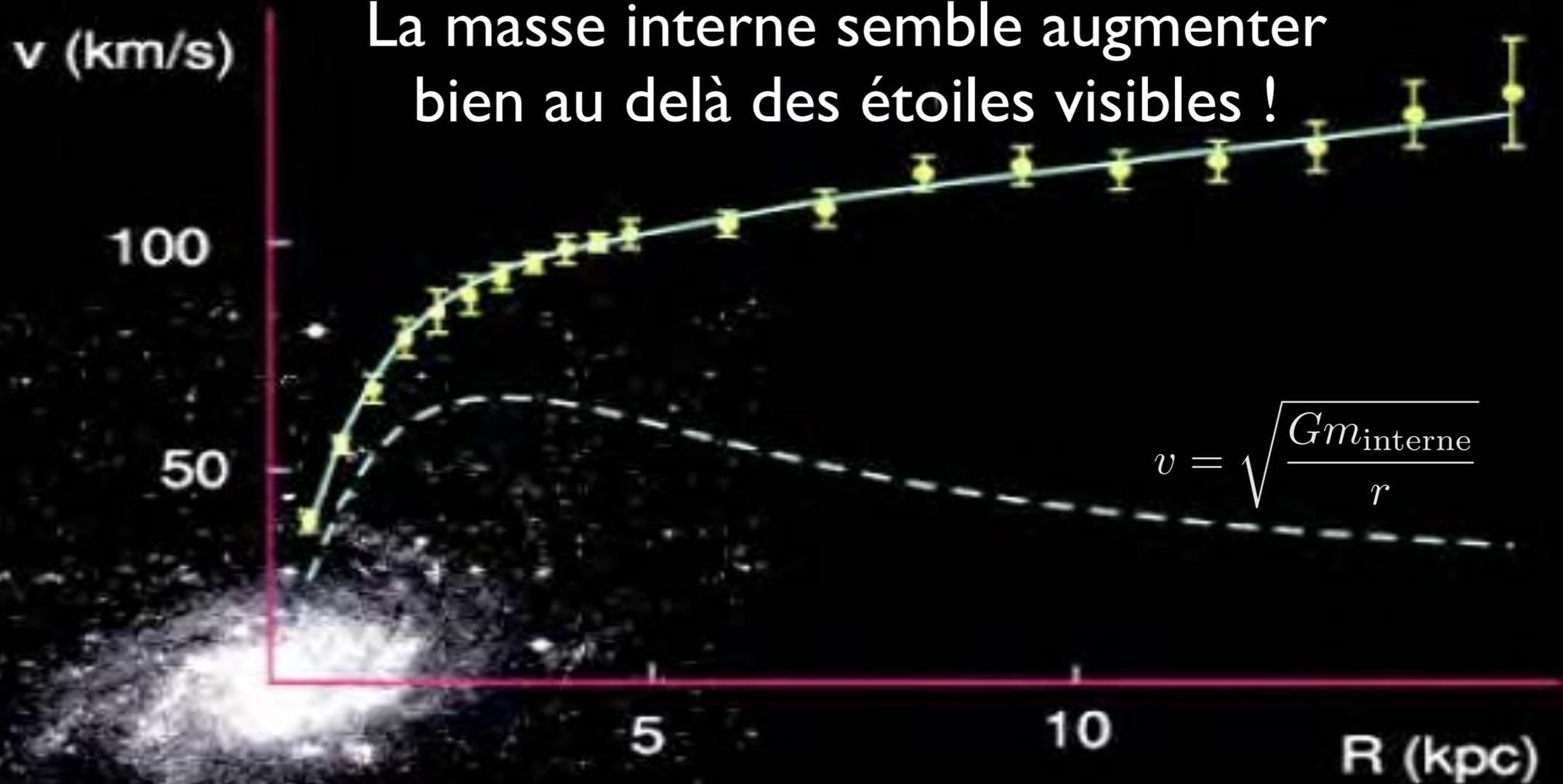
# Matière noire Galactique

Vitesse de rotation  
typique des étoiles :  
200 km/s

Le profil de vitesse  
permet de reconstruire  
la masse !

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

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



M33

# Halo de matière noire

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



# 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  $\sim 200$  kpc
  - ★ rapport Masse/Luminosité  $\sim 200$



# Grandes structures



24/08/2015  
Montpellier



J.-Ch. Hamilton



# Grandes structures



24/08/2015  
Montpellier



J.-Ch. Hamilton

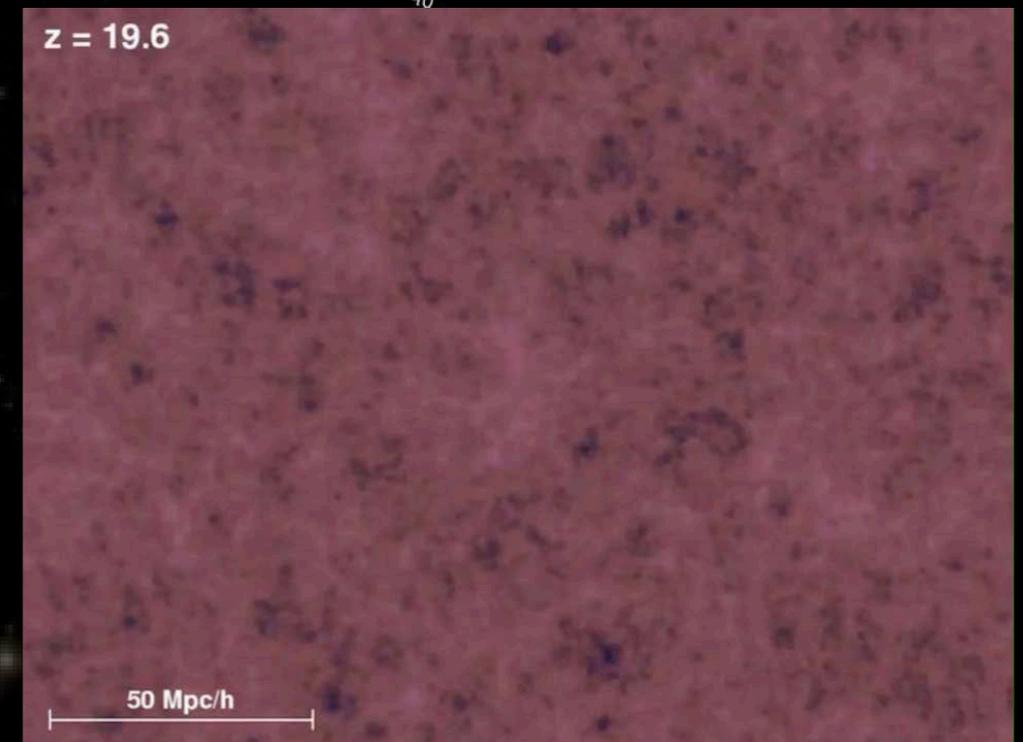
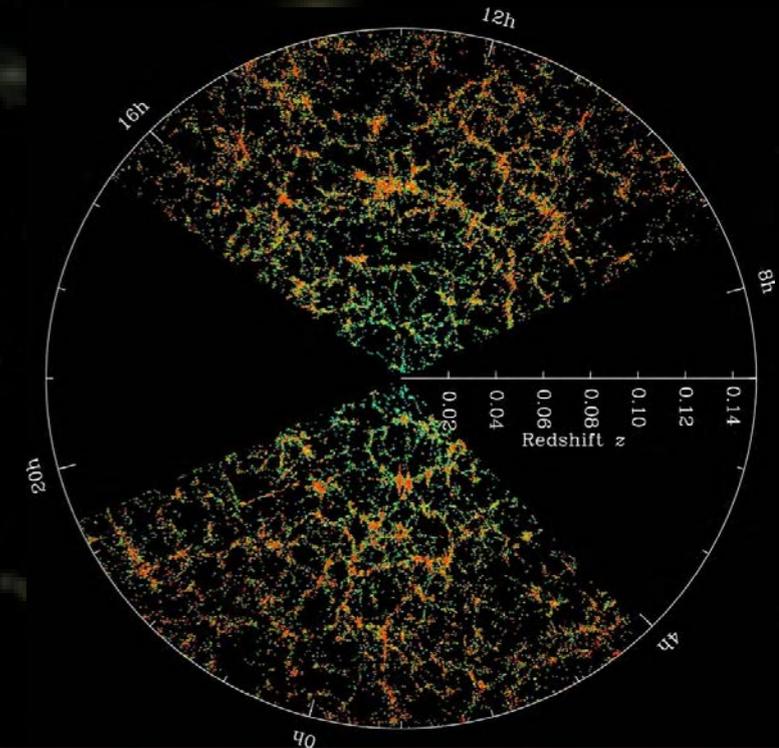


# Matière noire et grandes structures

- 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

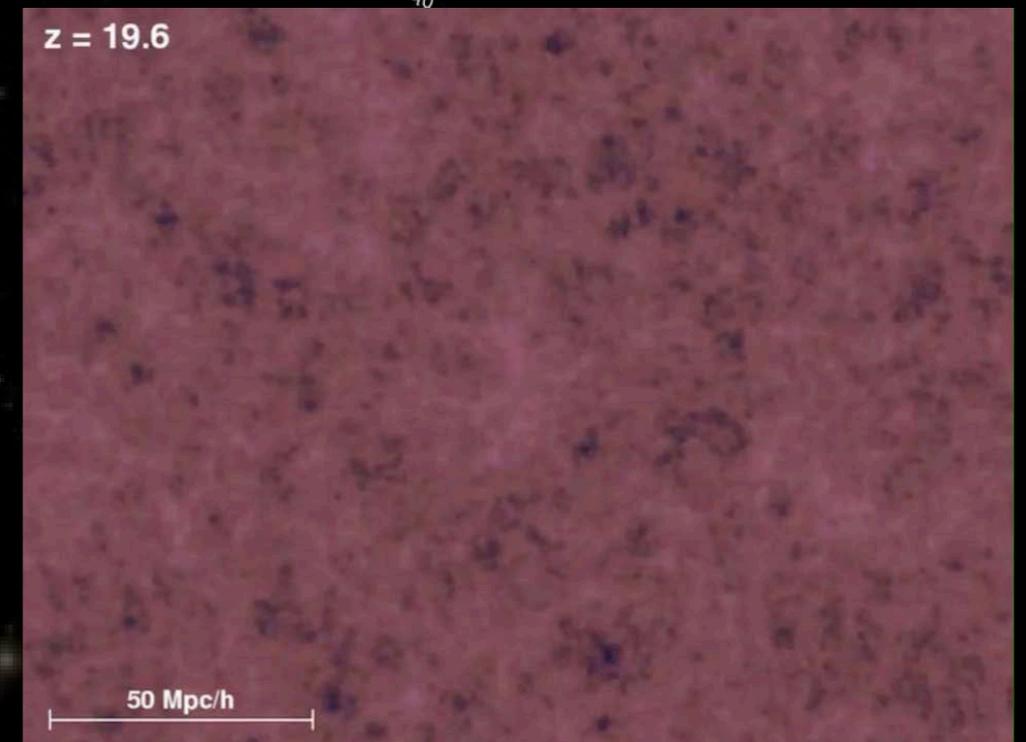
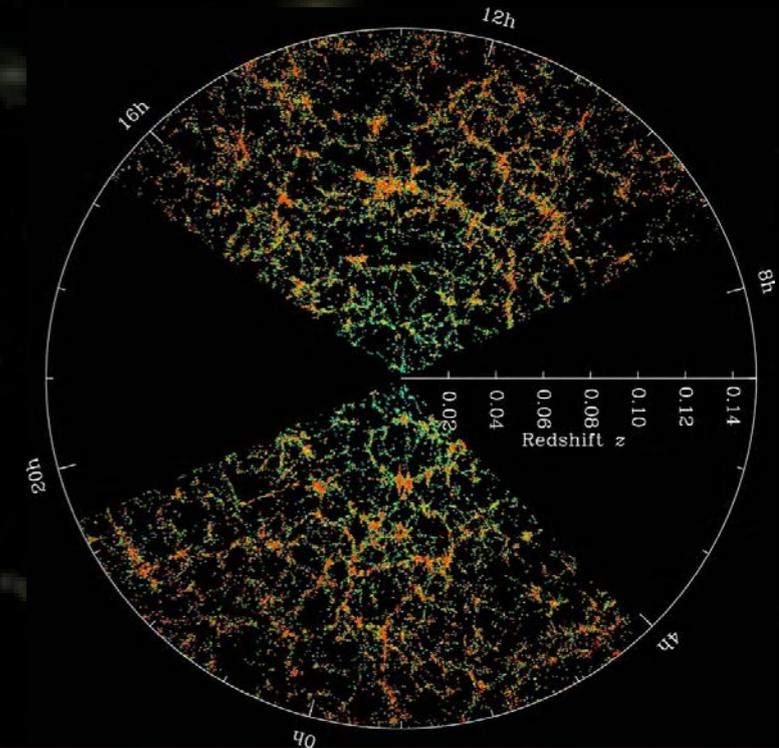


# Matière noire et grandes structures

- 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 : $\Lambda$

constante cosmologique ?



24/08/2015  
Montpellier



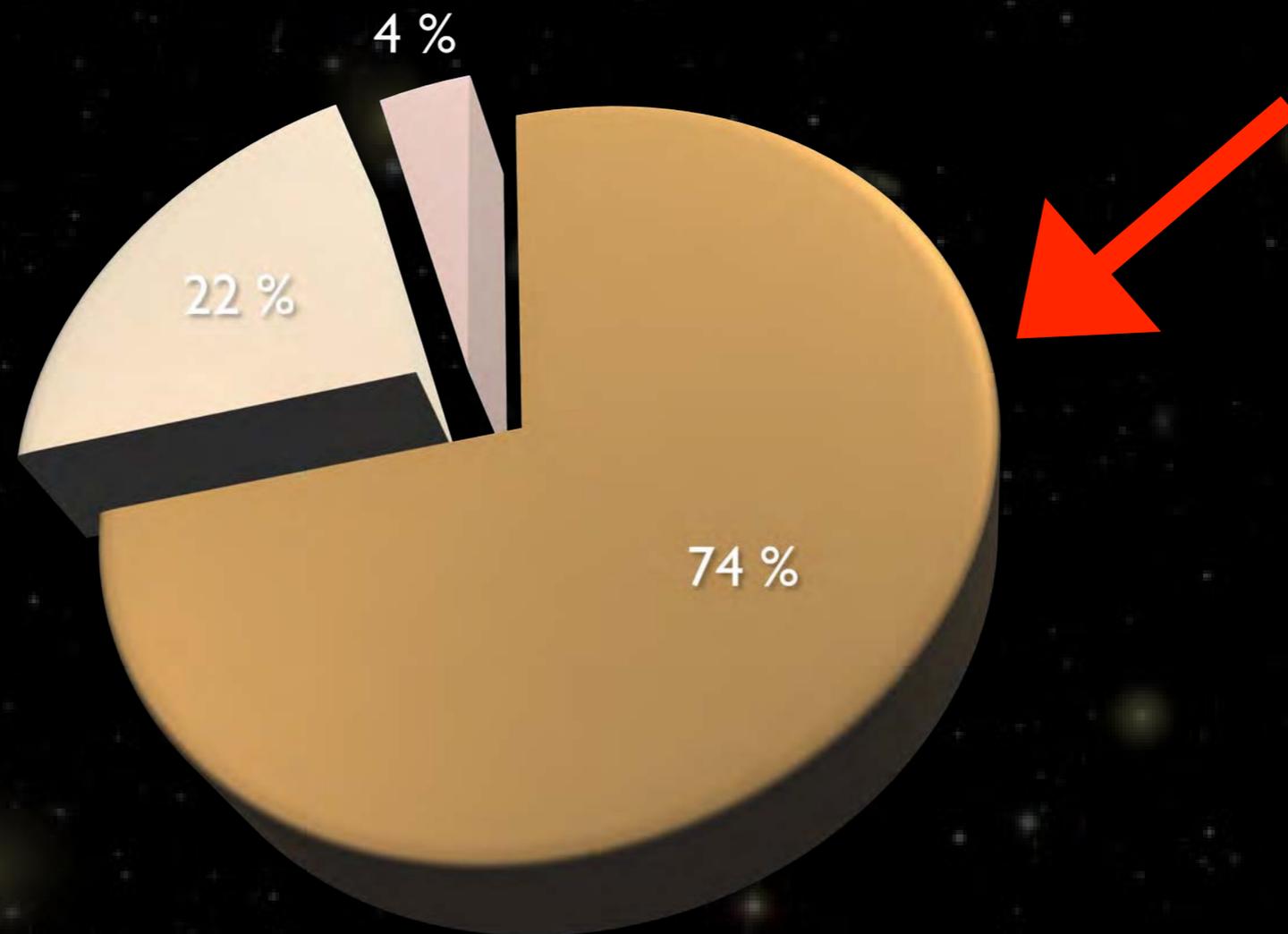
J.-Ch. Hamilton



# Énergie sombre : $\Lambda$

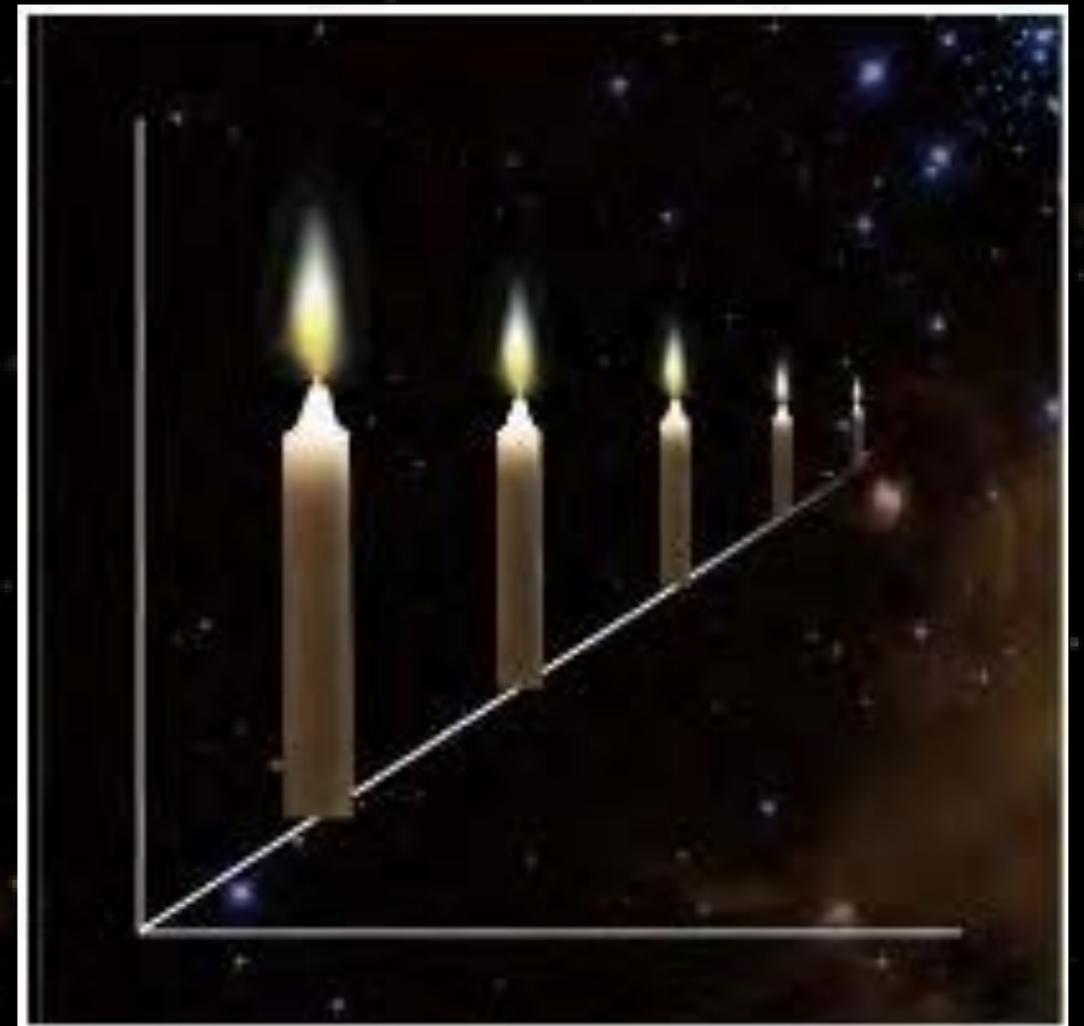
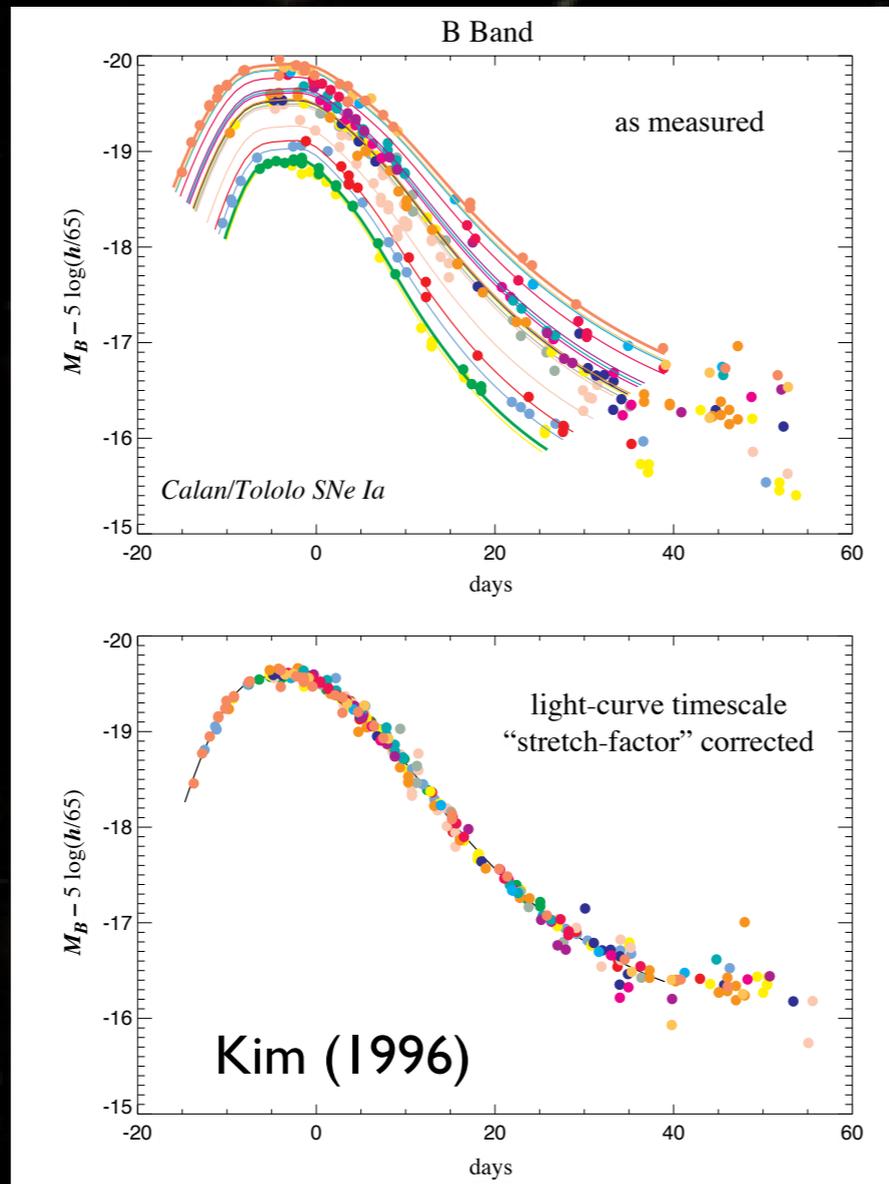
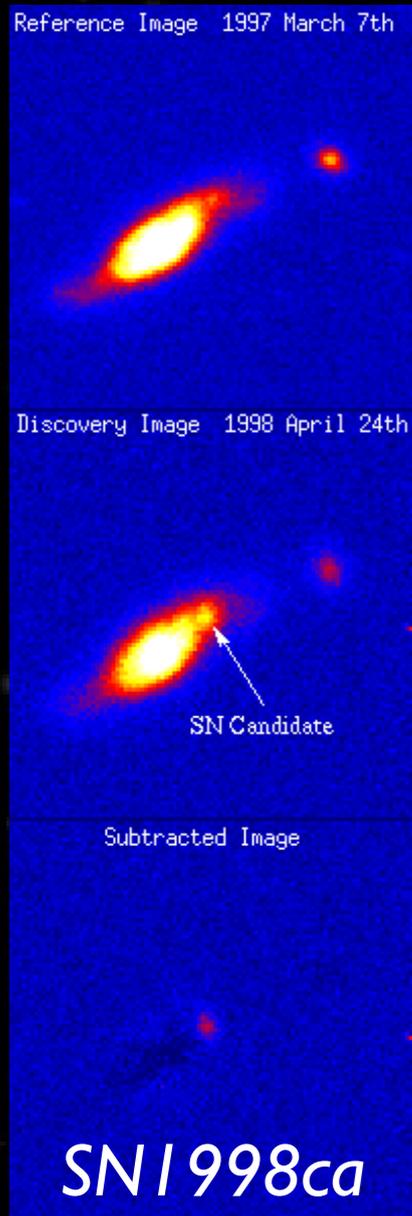
constante cosmologique ?

● Énergie sombre   ● Matière noire   ● Matière « normale » (baryonique)



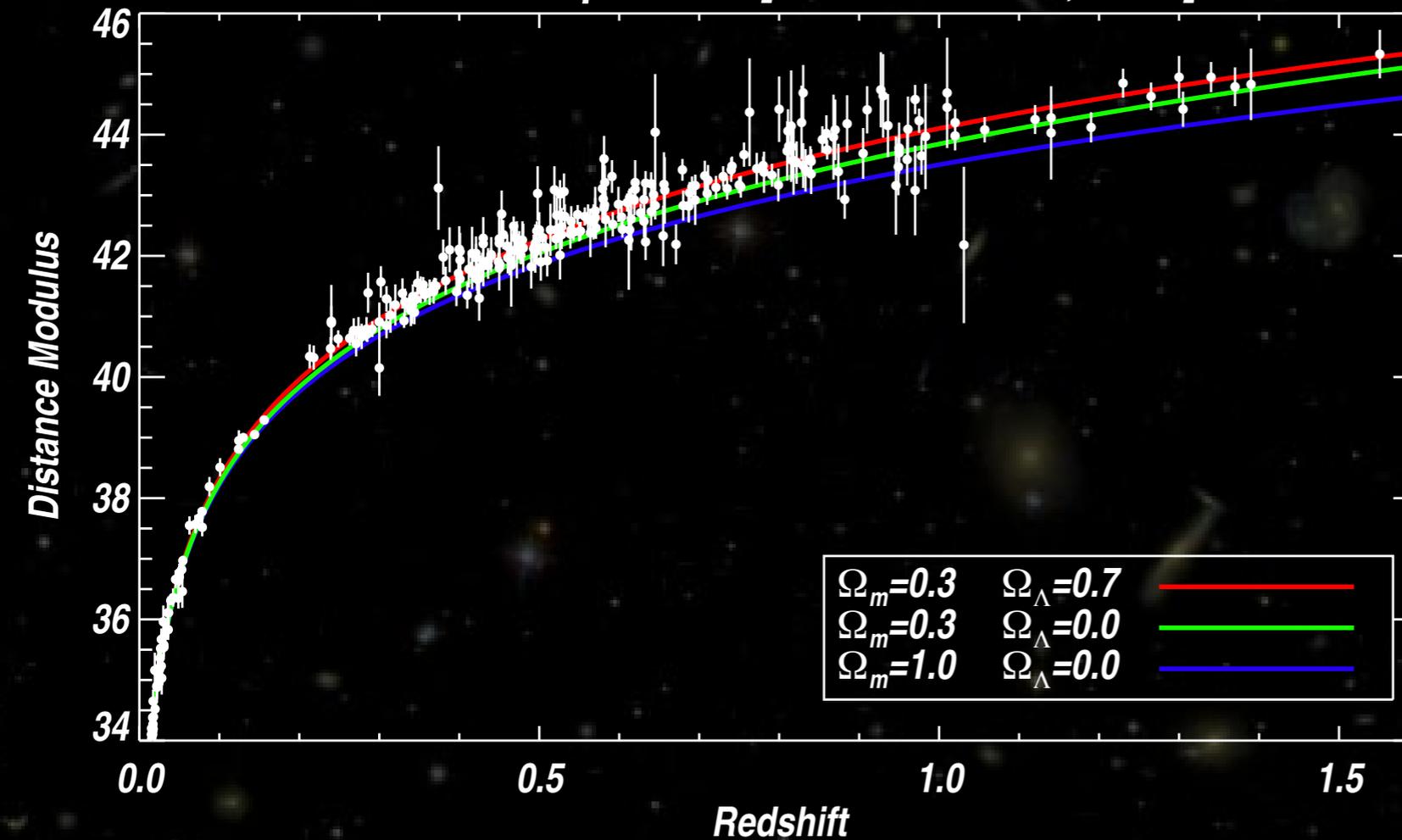
# Supernovae de type Ia (SNIa) : Chandelles standard

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



# «Découverte» de $\Lambda$ : 1998

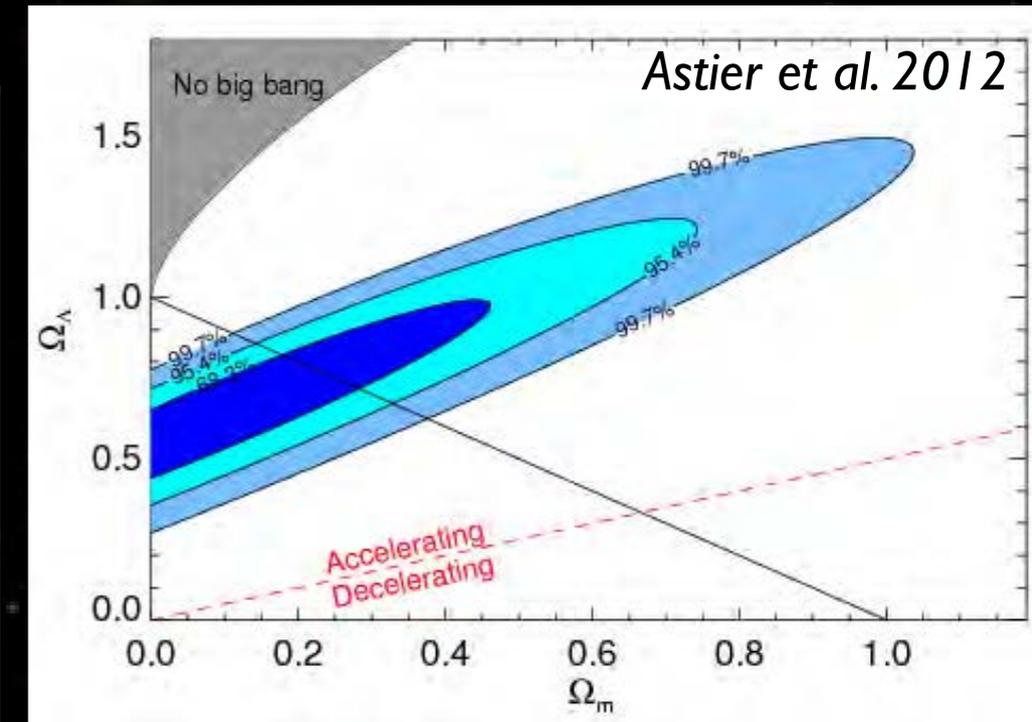
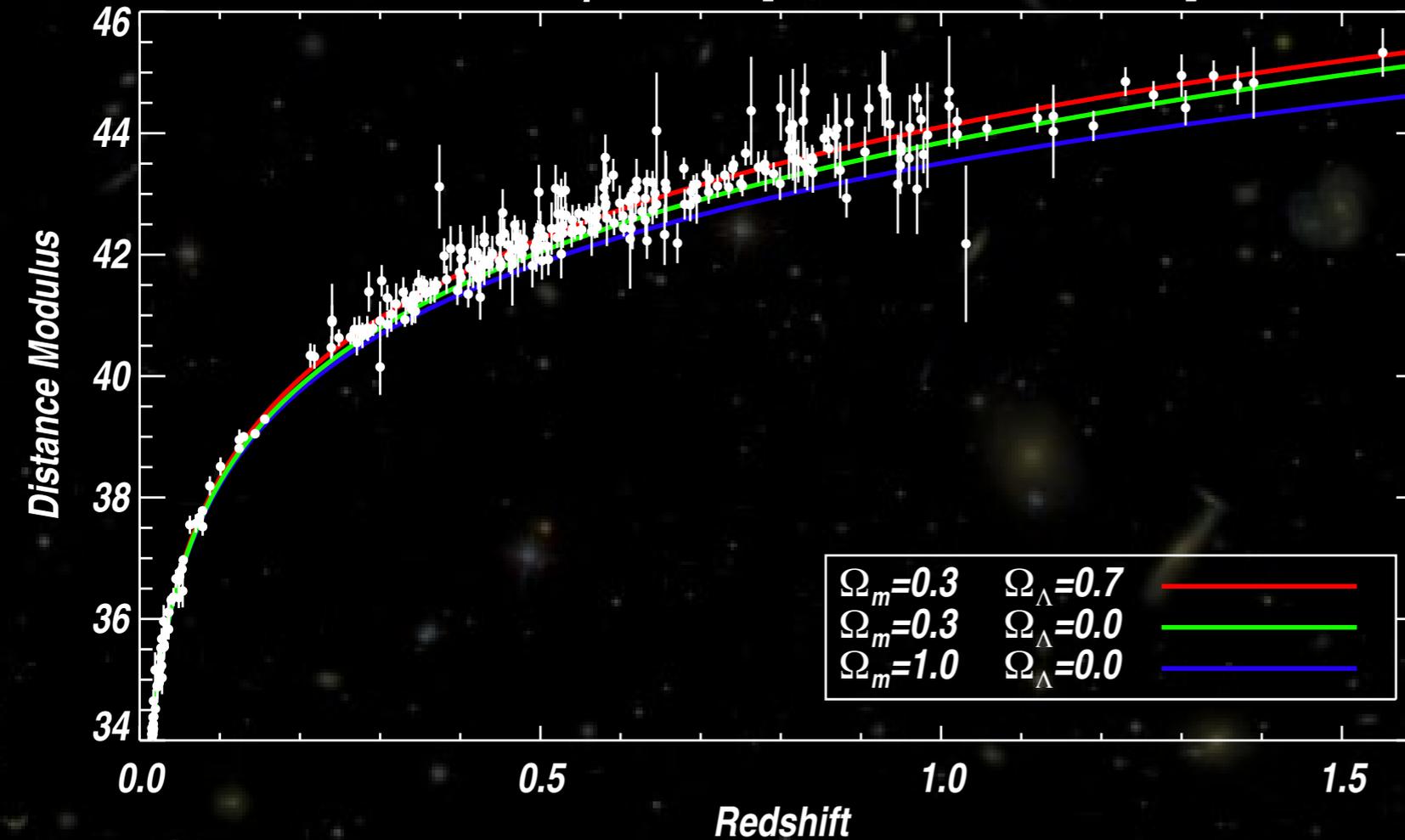
Union Sample from [Kowalski et al., 2008]



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

# «Découverte» de $\Lambda$ : 1998

Union Sample from [Kowalski et al., 2008]

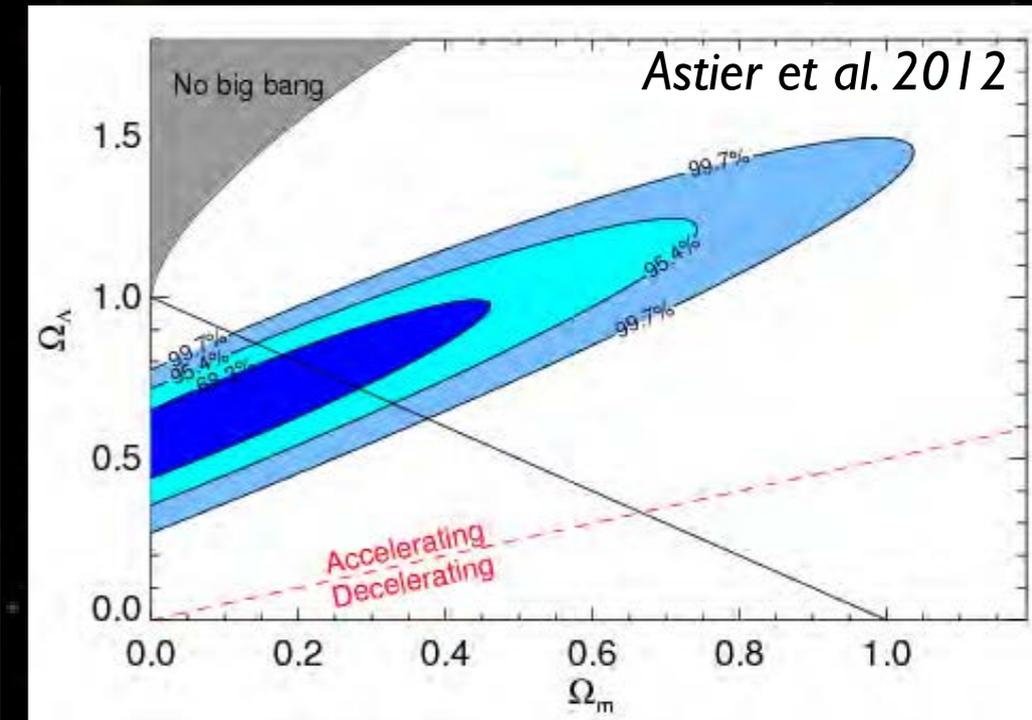
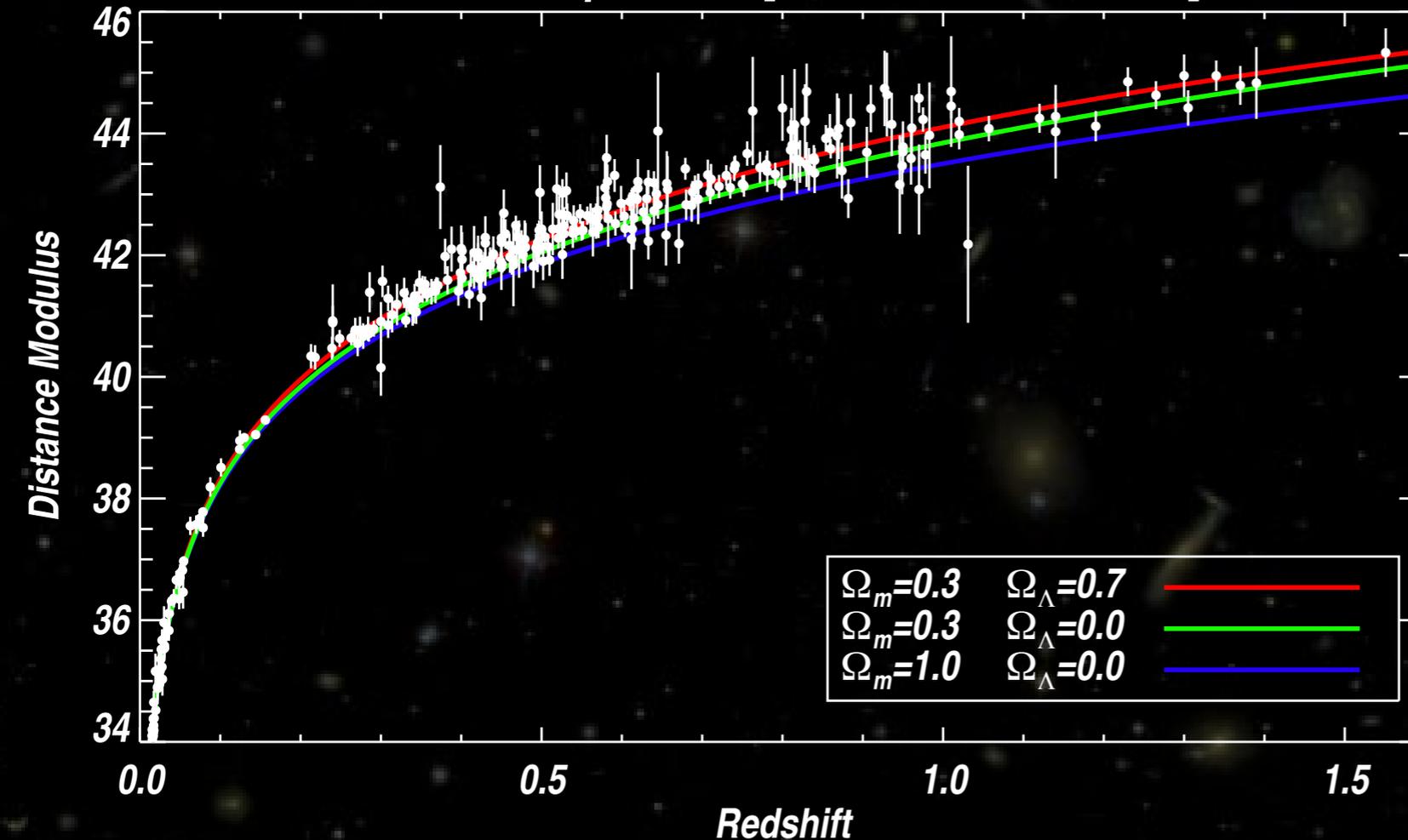


L'Univers est en expansion accélérée !

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

# «Découverte» de $\Lambda$ : 1998

Union Sample from [Kowalski et al., 2008]



L'Univers est en expansion accélérée !

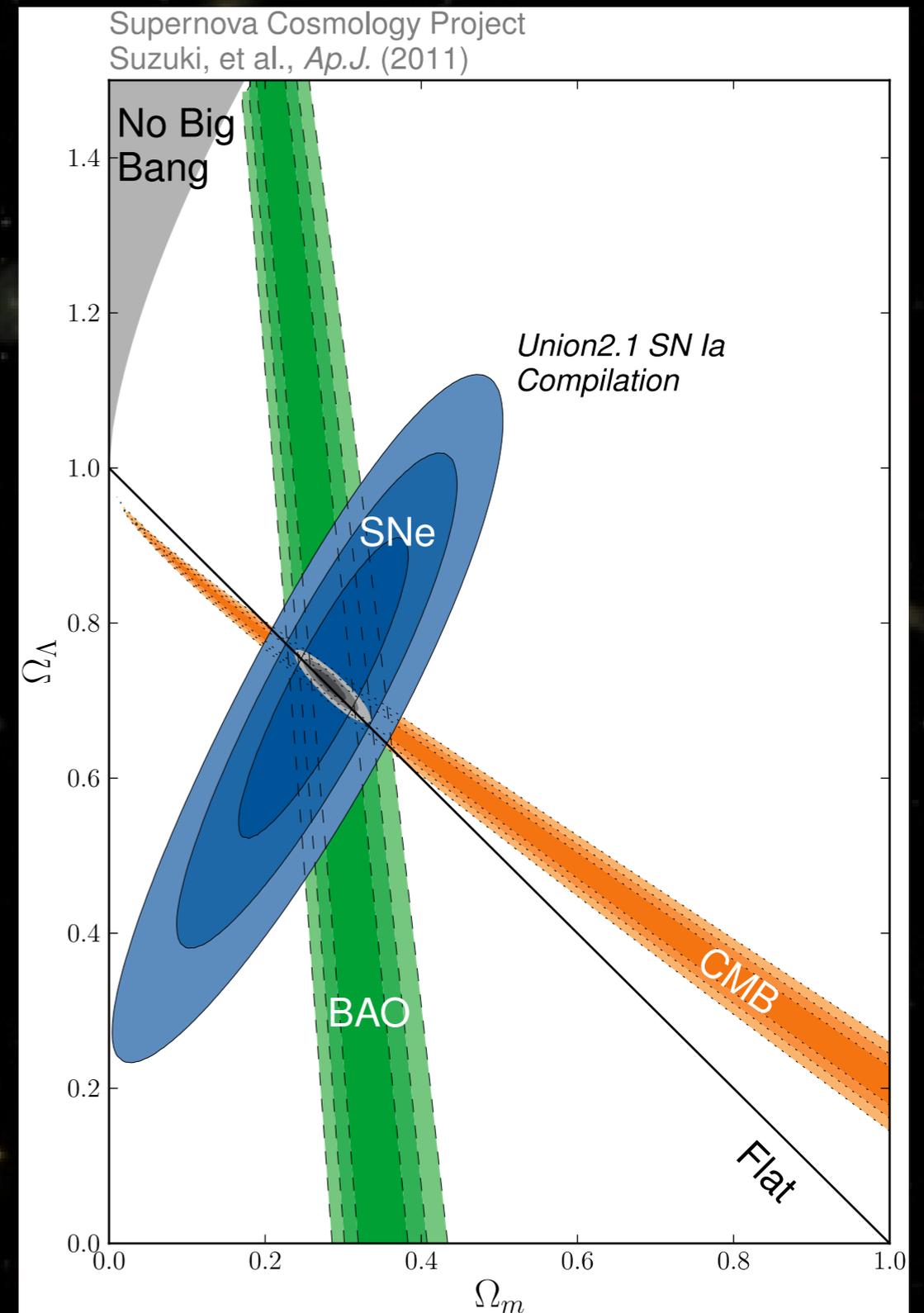
- Deux équipes :
  - ★ SCP : Perlmutter et al.
  - ★ High-z : Riess et al.



Prix Nobel 2011

# Preuves expérimentales de $\Lambda$

- Trois méthodes indépendantes
- Convergence remarquable
  - ★  $\Omega_m=0.3$     $\Omega_\Lambda=0.7$
- $\Lambda$ CDM est incontournable
  - ★ Bug théorique ? observationnel ?
  - ★ Énergie noire ?
  - ★ Gravitation ?



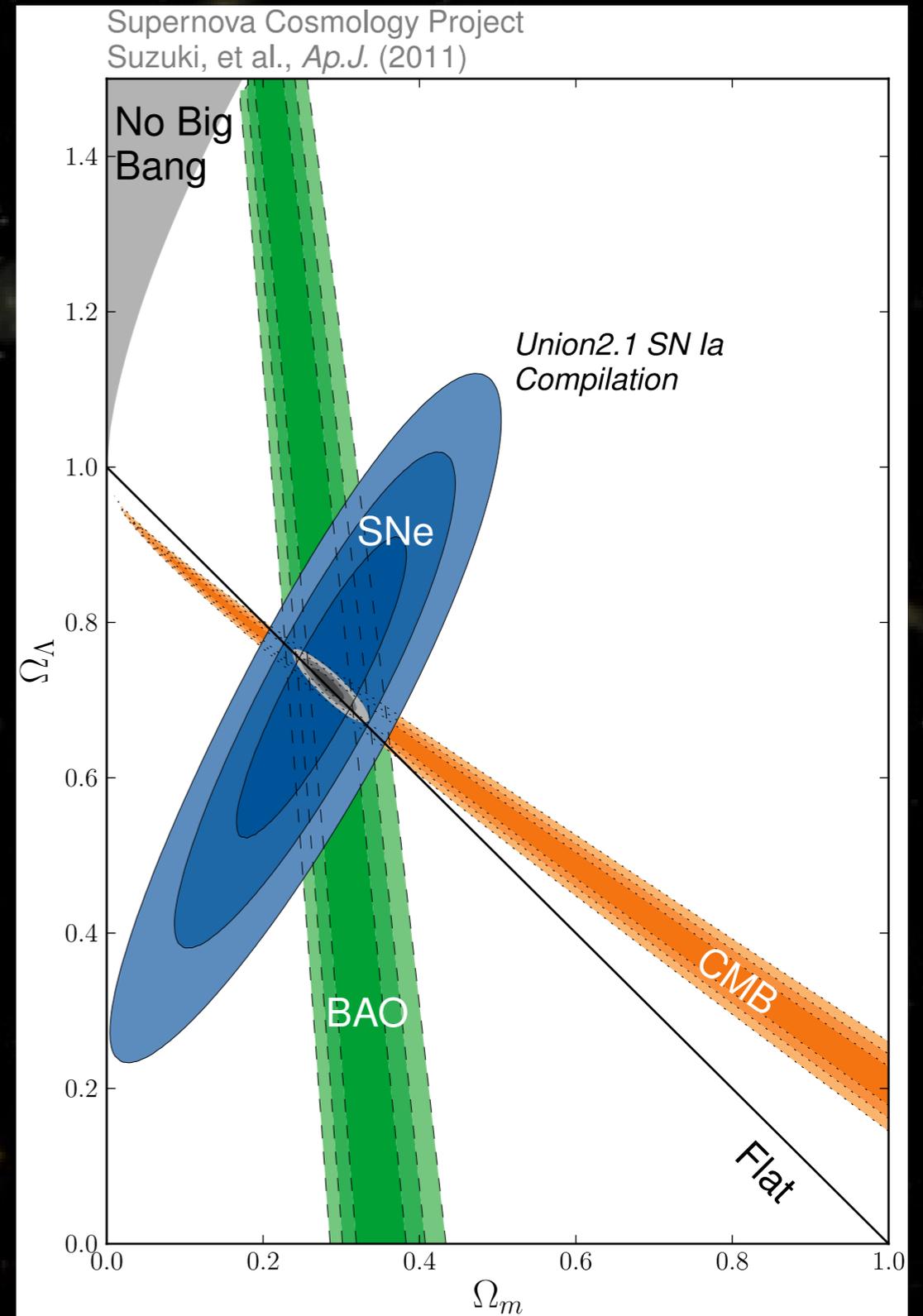
# Preuves expérimentales de $\Lambda$

- Trois méthodes indépendantes
- Convergence remarquable
  - ★  $\Omega_m=0.3$     $\Omega_\Lambda=0.7$
- $\Lambda$ CDM est incontournable
  - ★ Bug théorique ? observationnel ?
  - ★ Énergie noire ?
  - ★ Gravitation ?

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

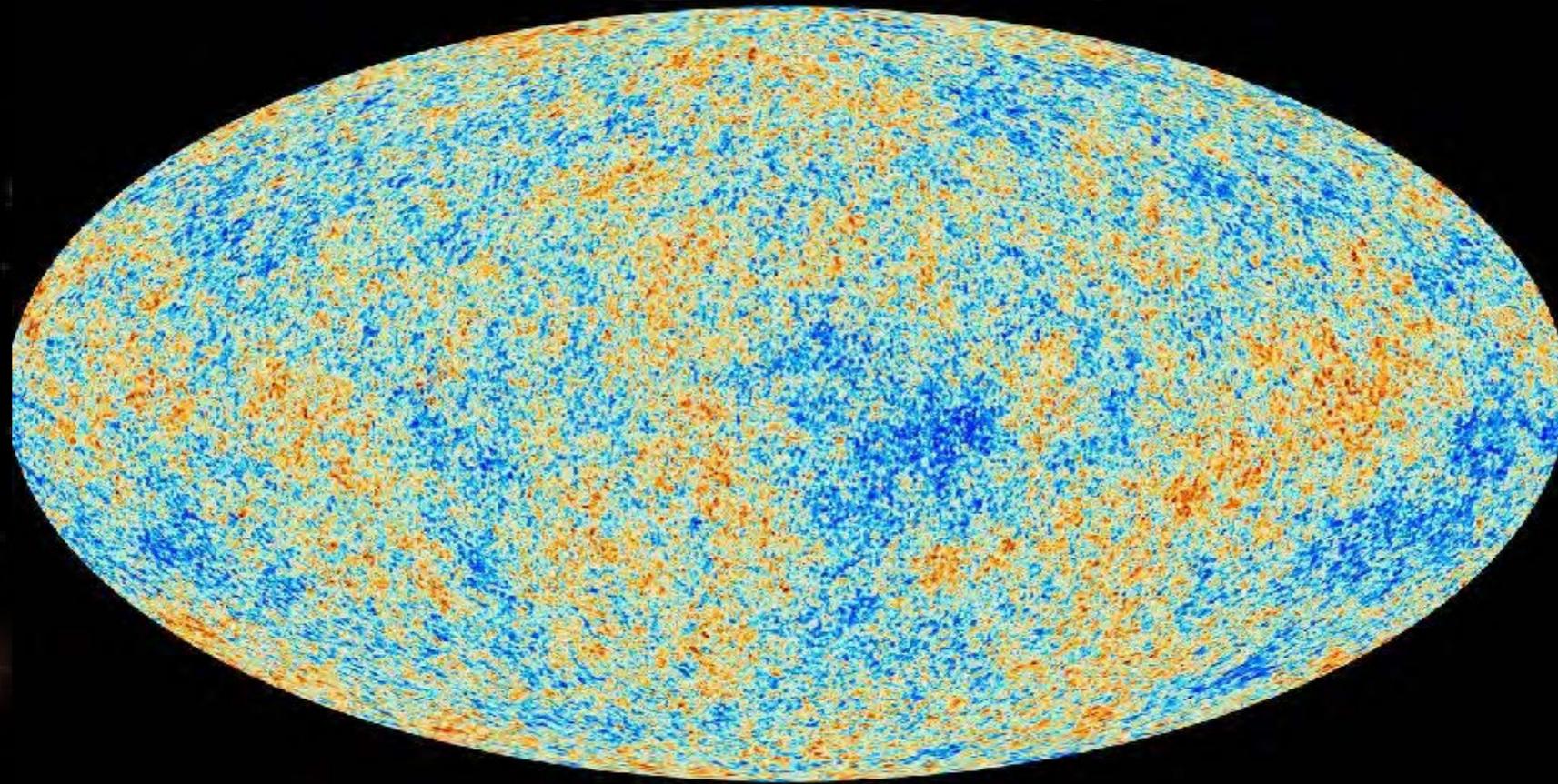
Espace-temps

Contenu matériel



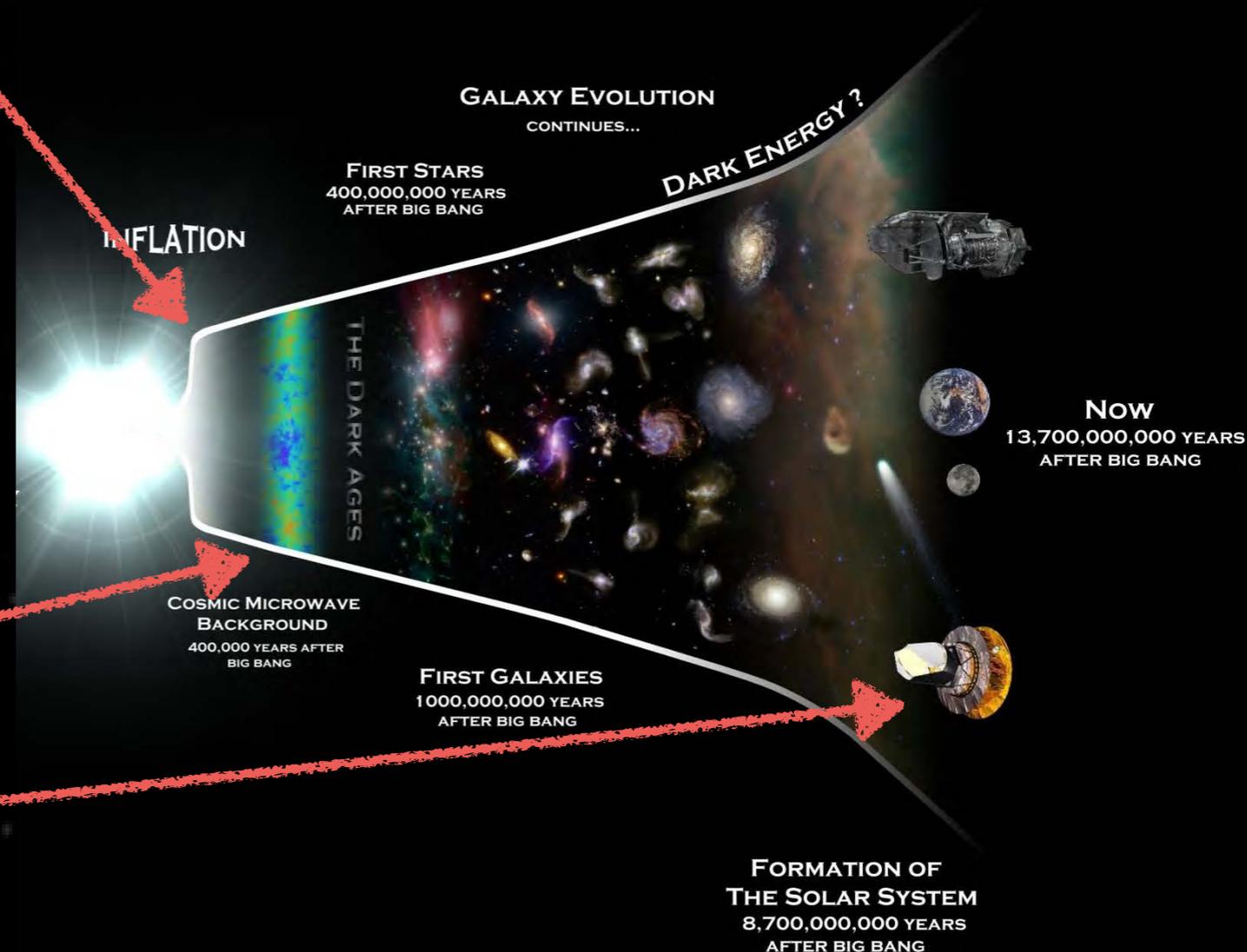
# Le fond diffus cosmologique

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/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
  - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang



G. Gamow



A. Penzias & R. Wilson

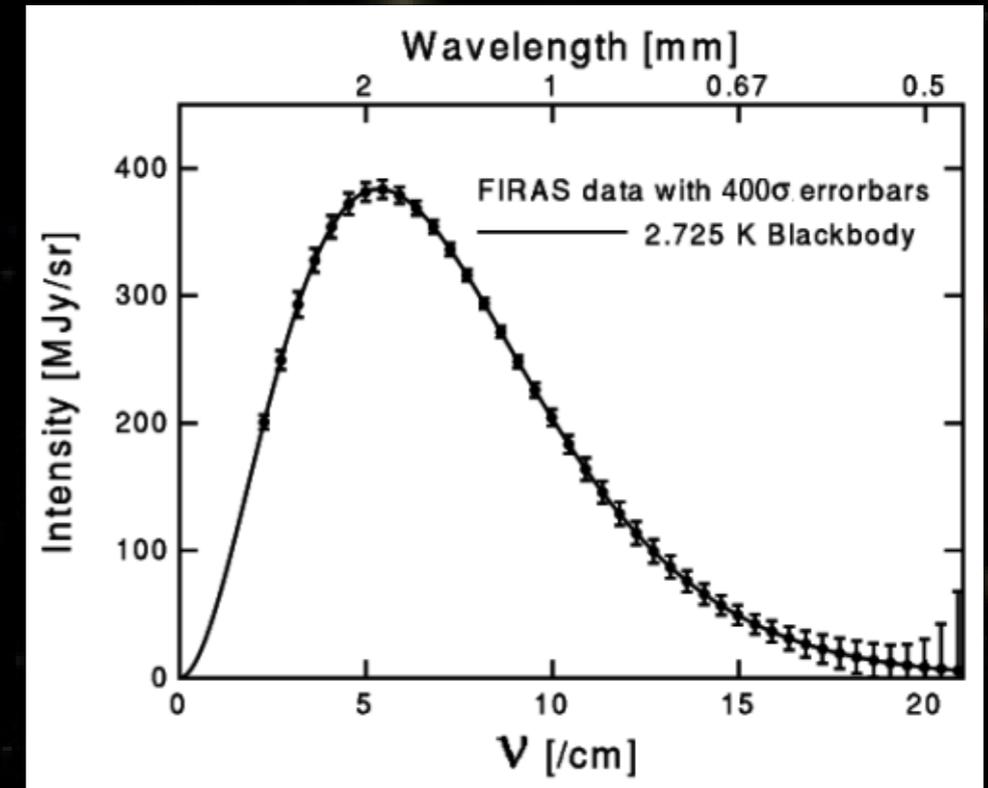
- Prix Nobel :

- ★ 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/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
  - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang



(COBE/DMR homepage)

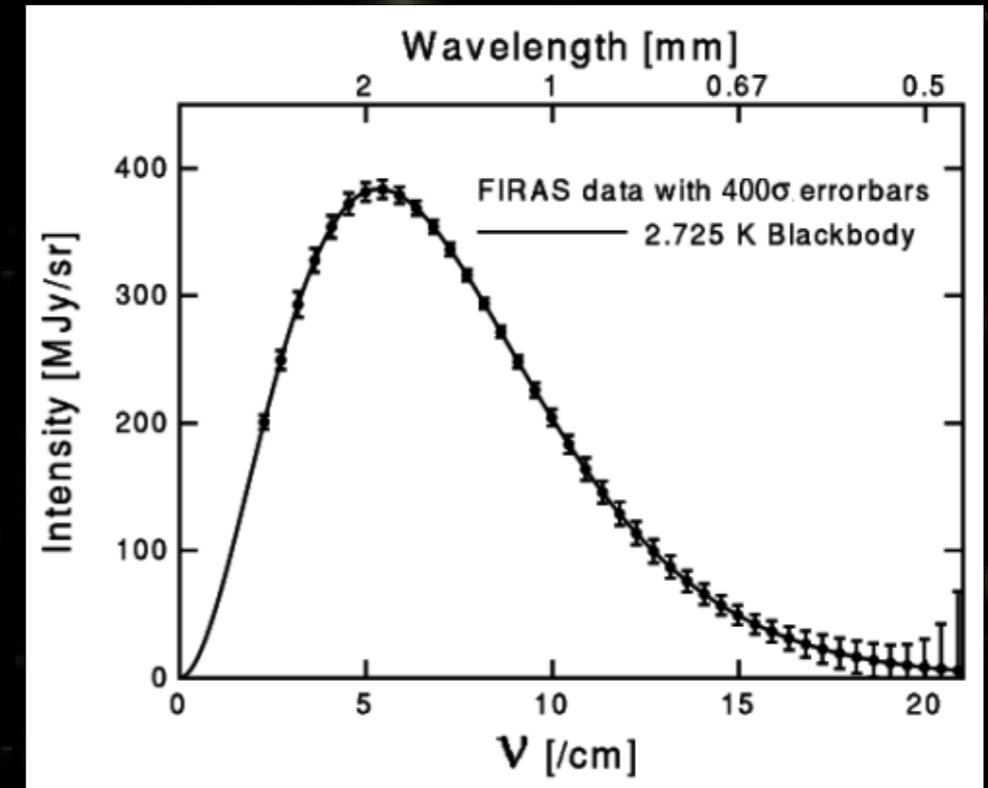
- Prix Nobel :

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

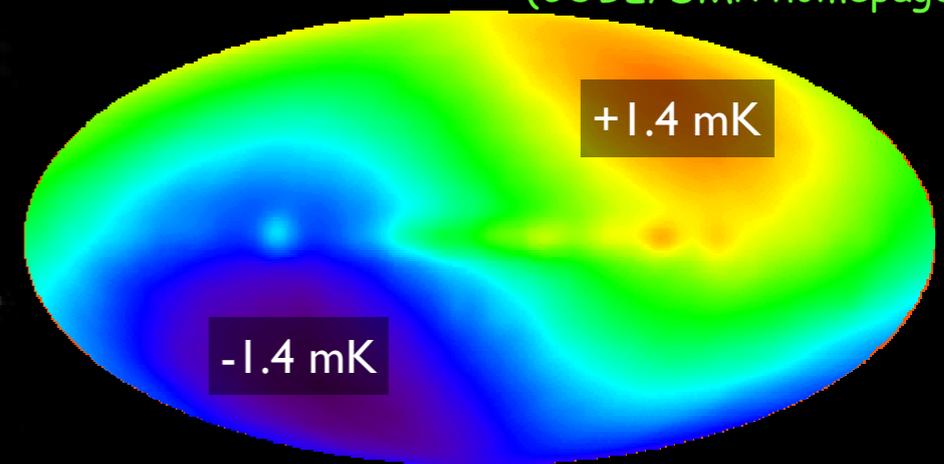


# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
  - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang



(COBE/DMR homepage)



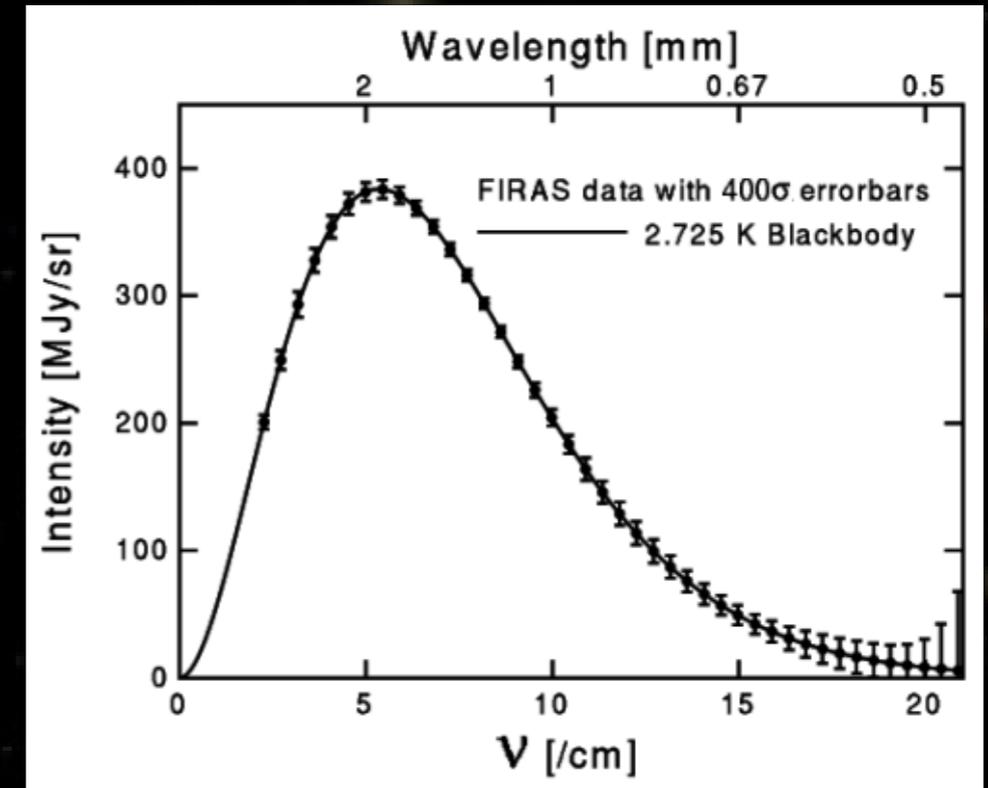
- Prix Nobel :

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

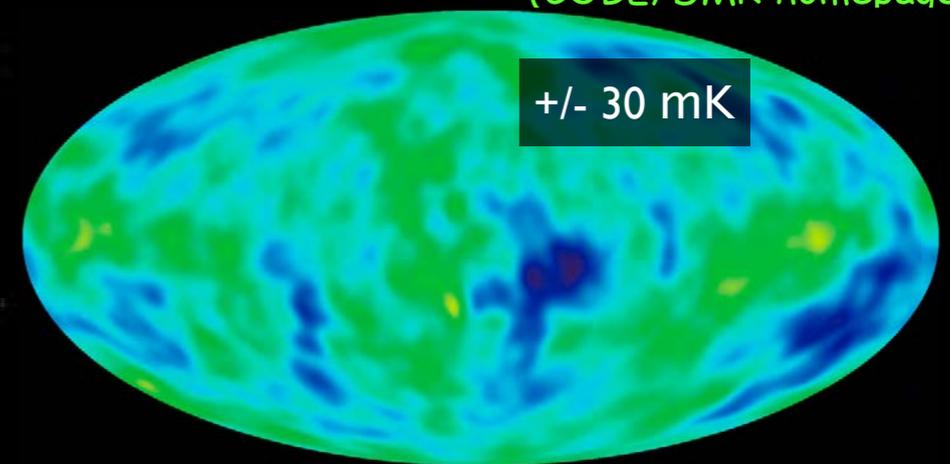


# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
  - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang



(COBE/DMR homepage)



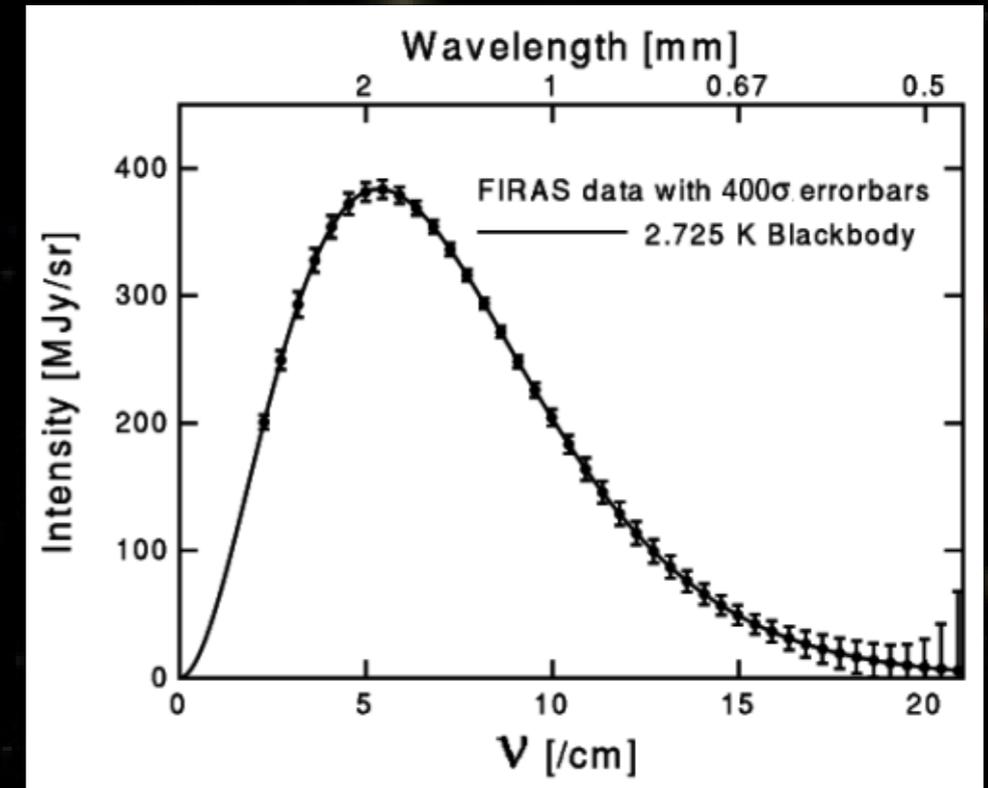
## ● Prix Nobel :

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

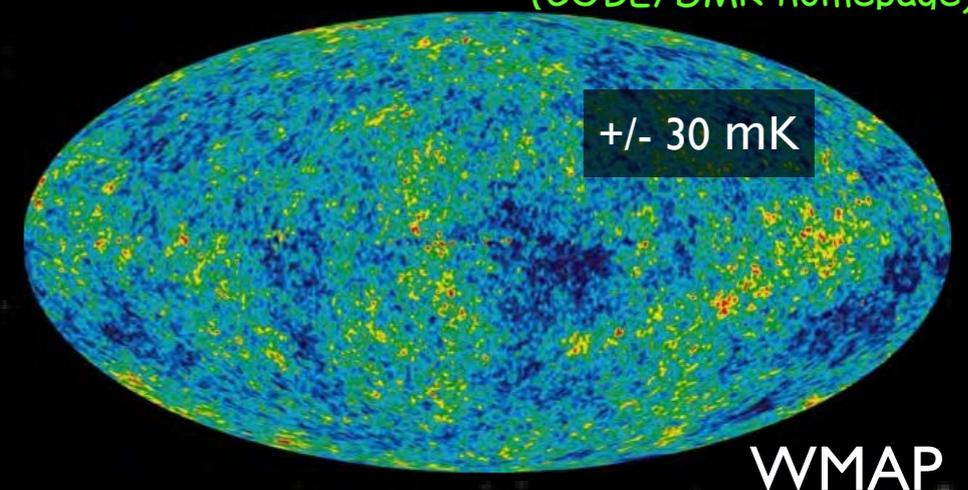


# Le fond diffus cosmologique (CMB)

- 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/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
  - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang



(COBE/DMR homepage)

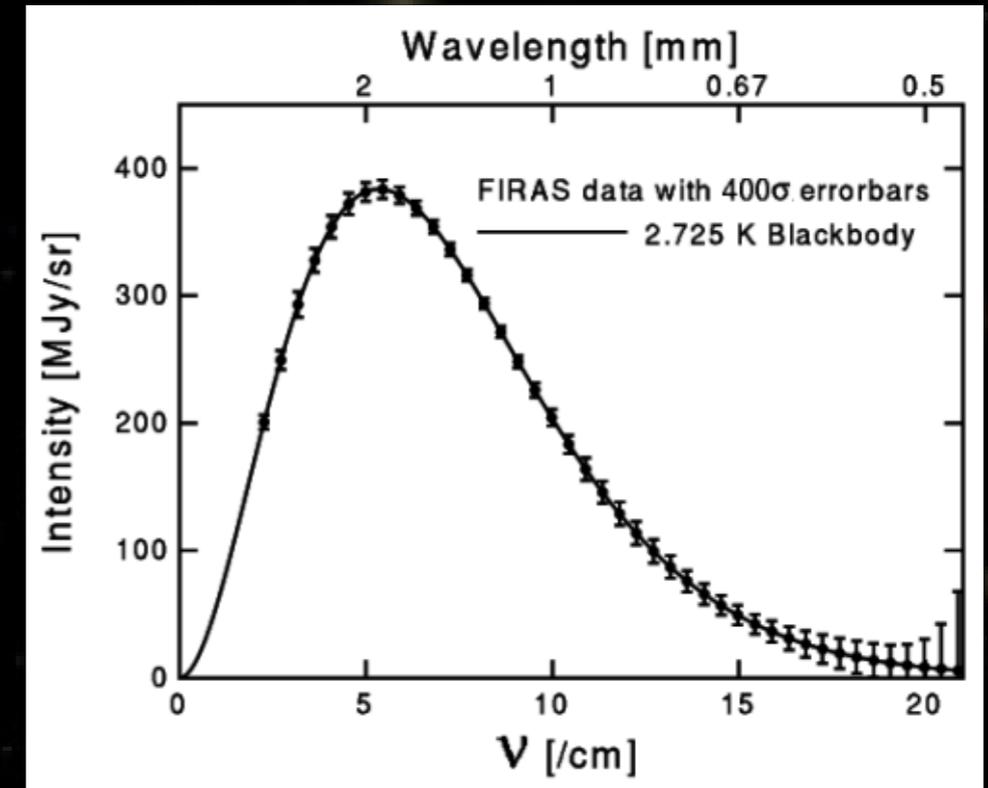


## ● Prix Nobel :

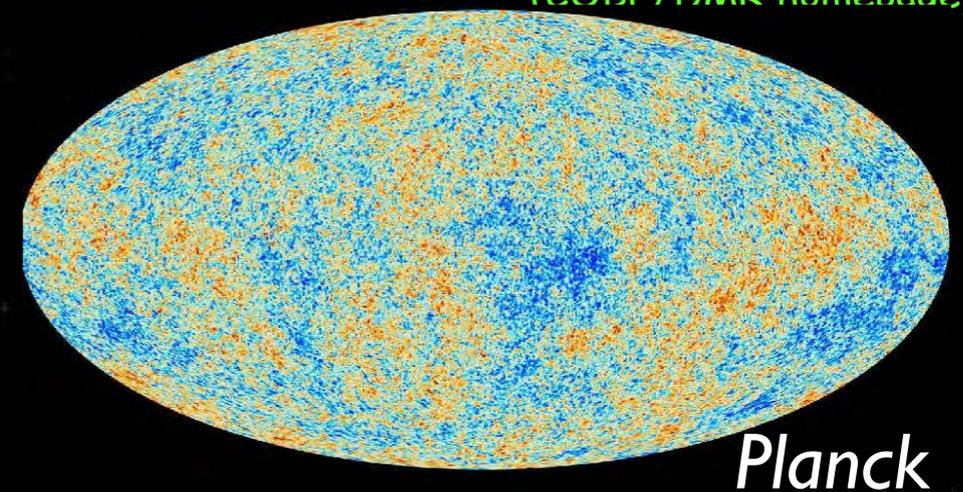
- ★ 1978 : Penzias & Wilson 
- ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE 

# 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/cm<sup>3</sup>
  - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
  - ★ émission: 400 000 ans après le BigBang



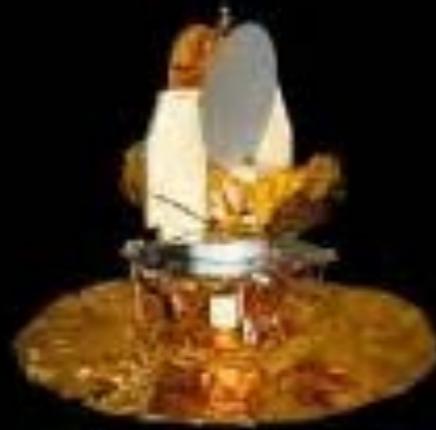
(COBE/DMR homage)



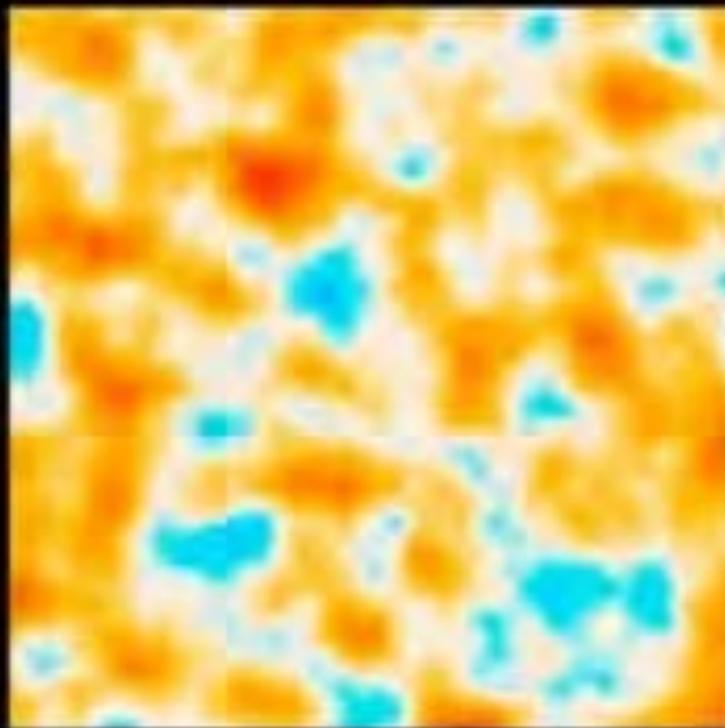
## ● Prix Nobel :

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

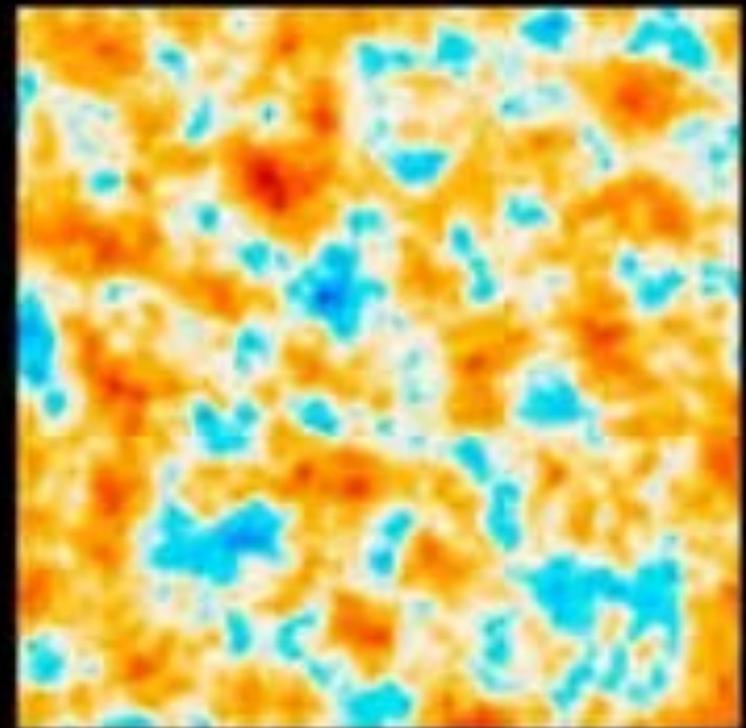




COBE  
(NASA)

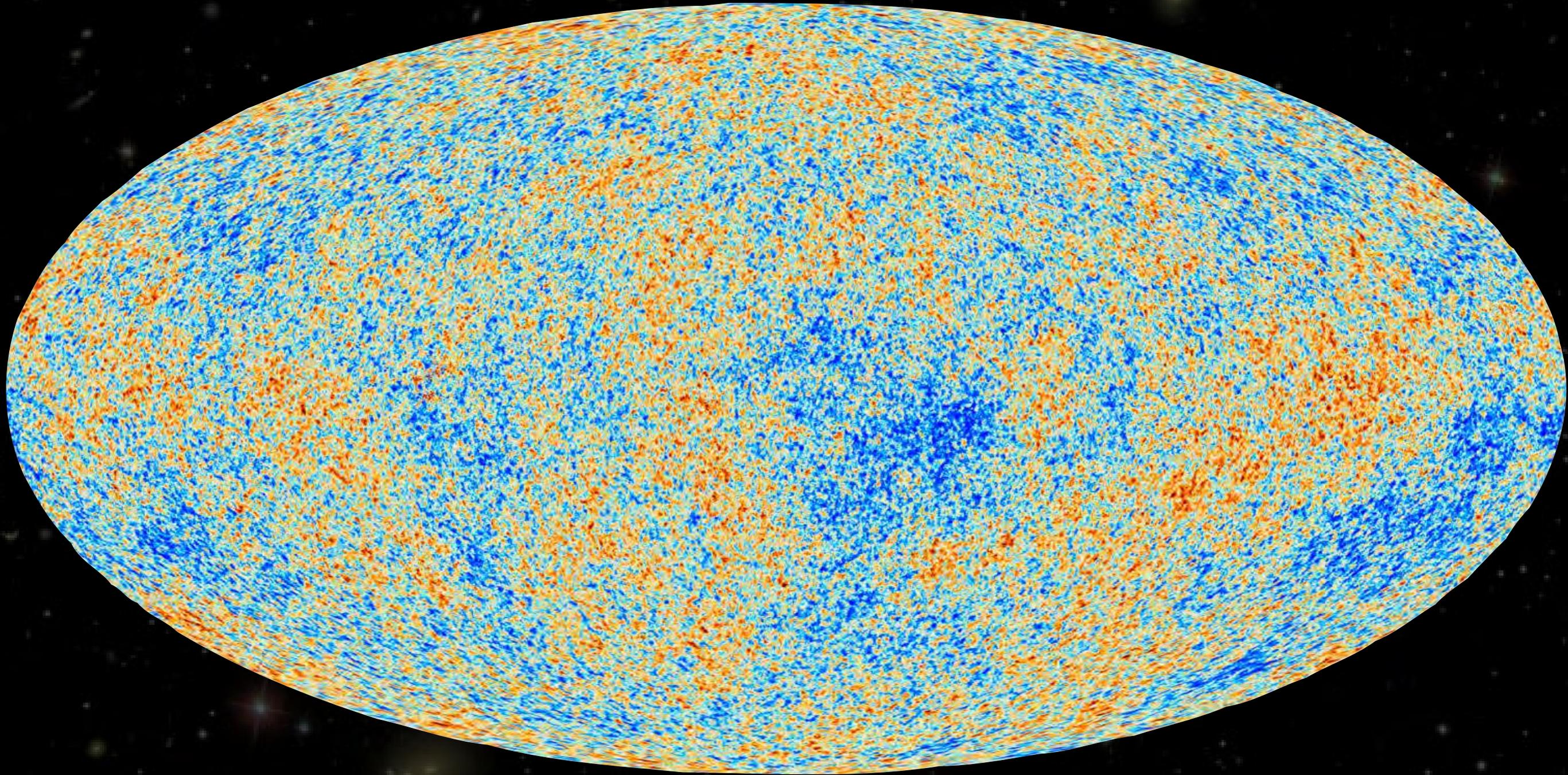


WMAP  
(NASA)

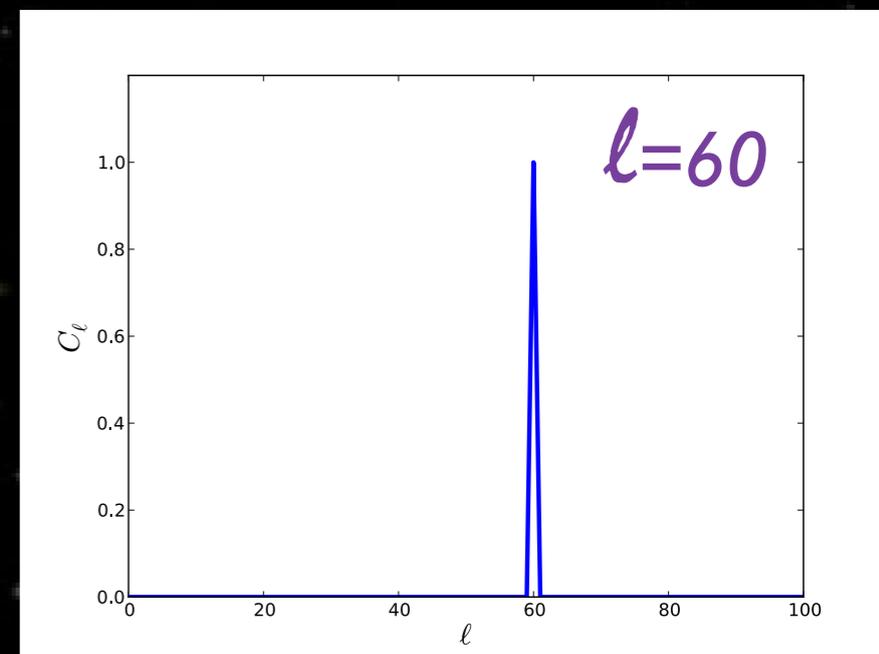
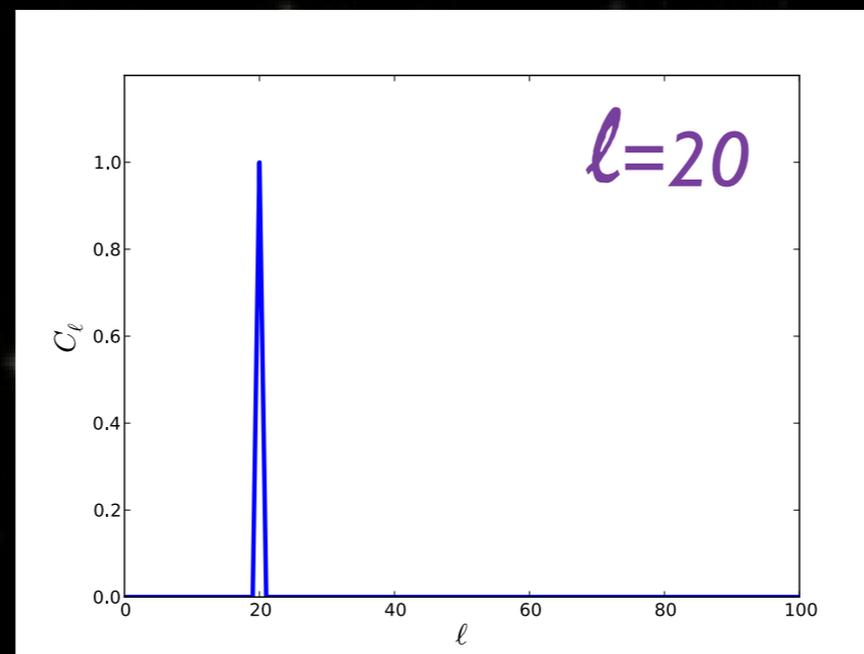
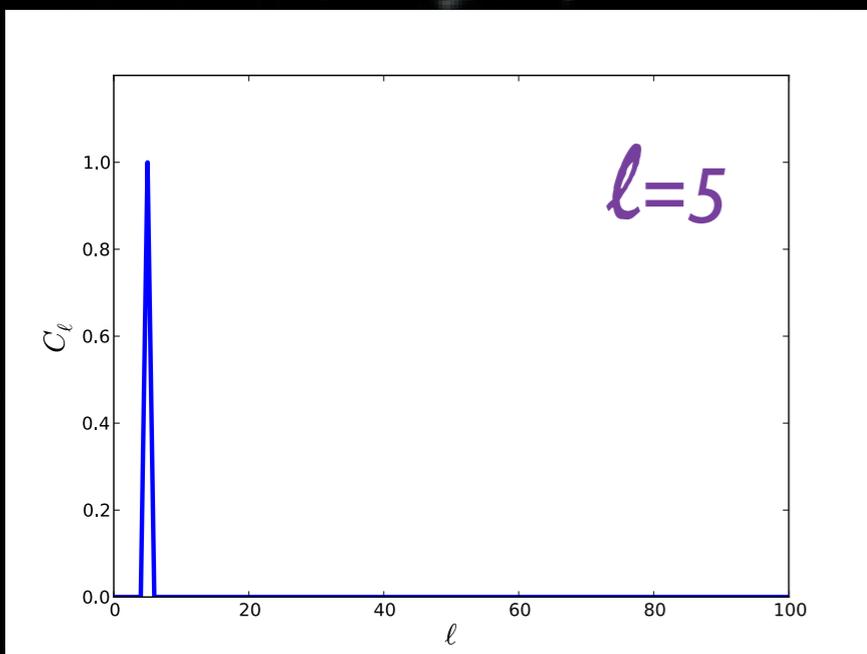
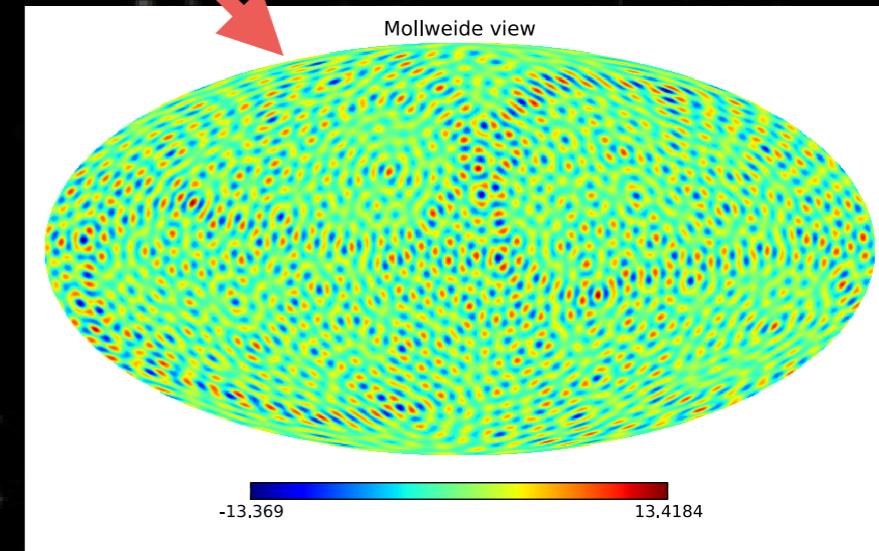
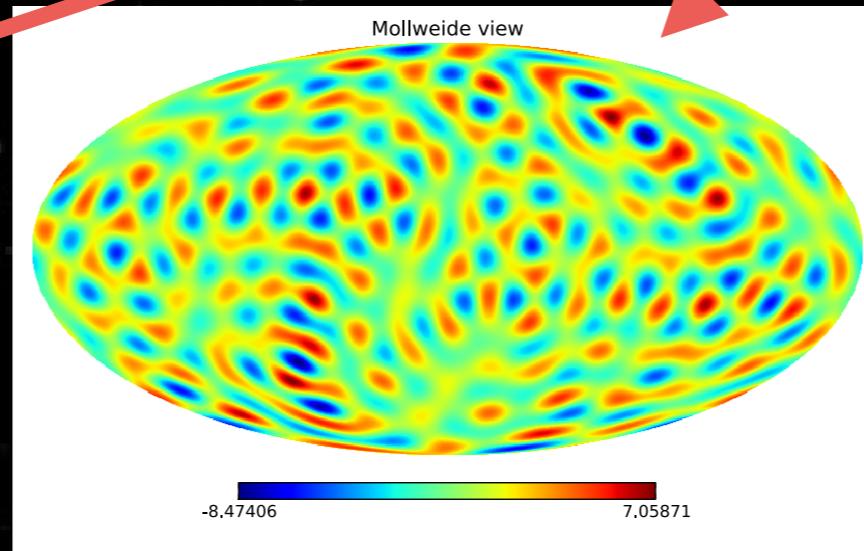
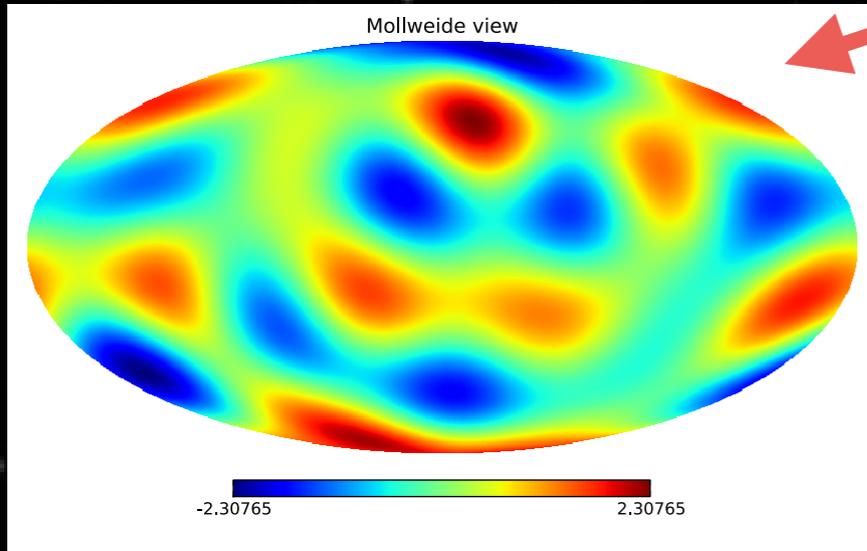
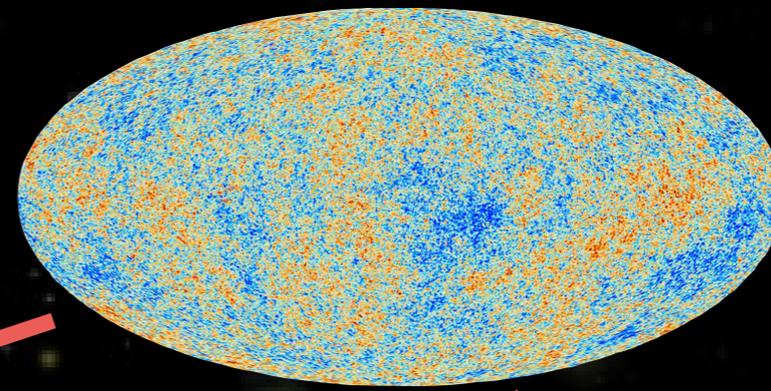


Planck  
(ESA)

# Résultats de Planck

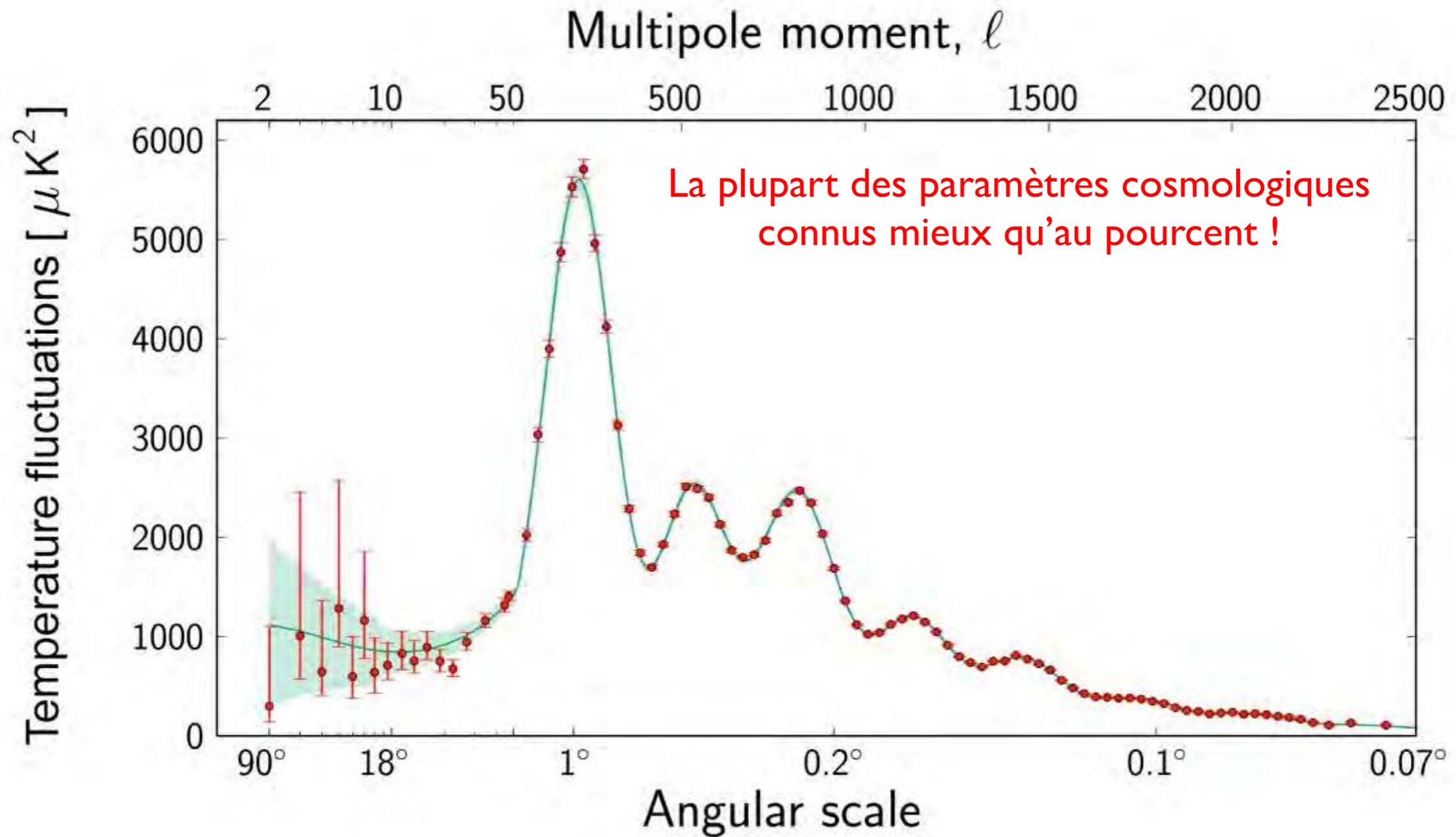


# Le spectre de puissance $C_\ell$

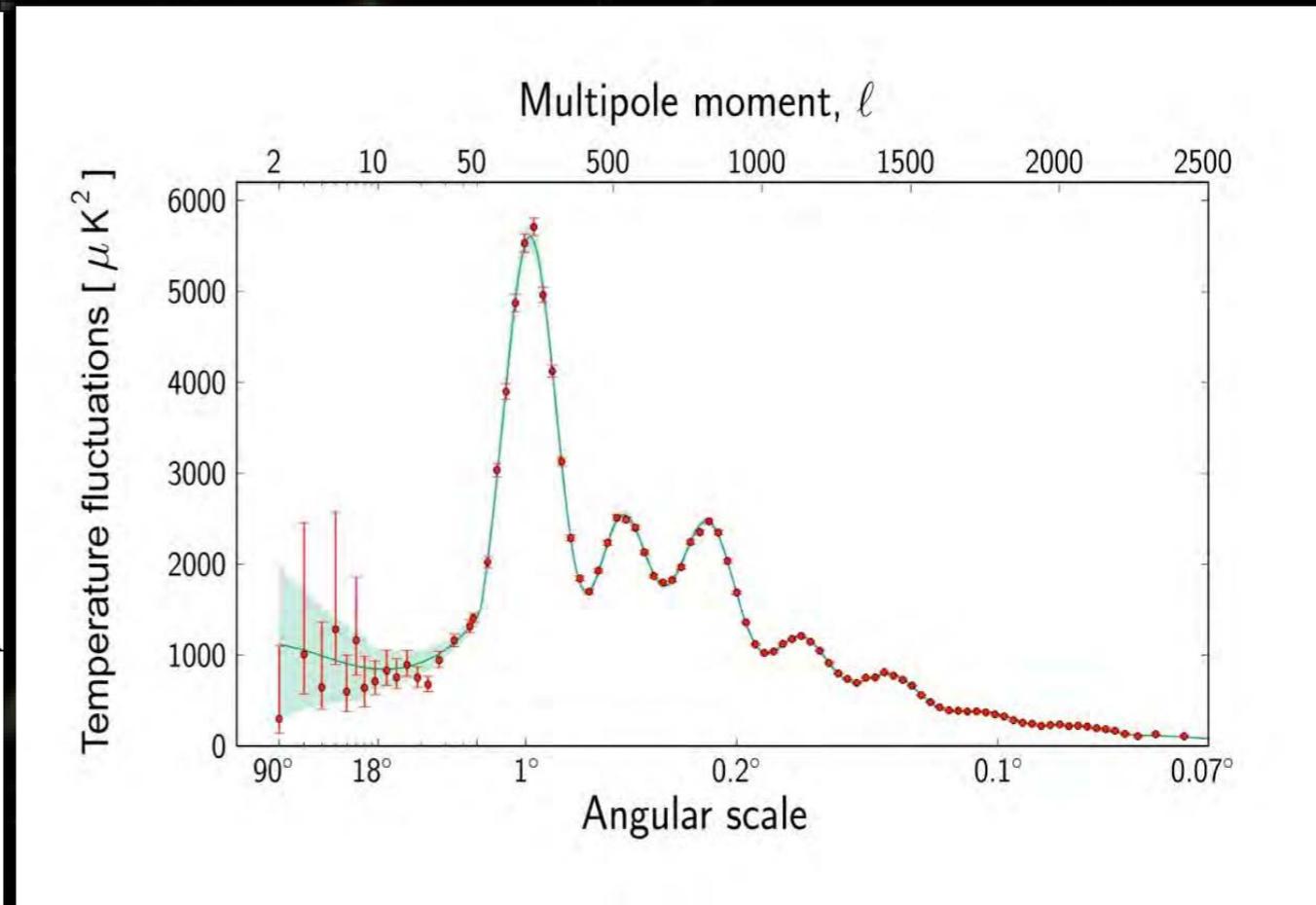
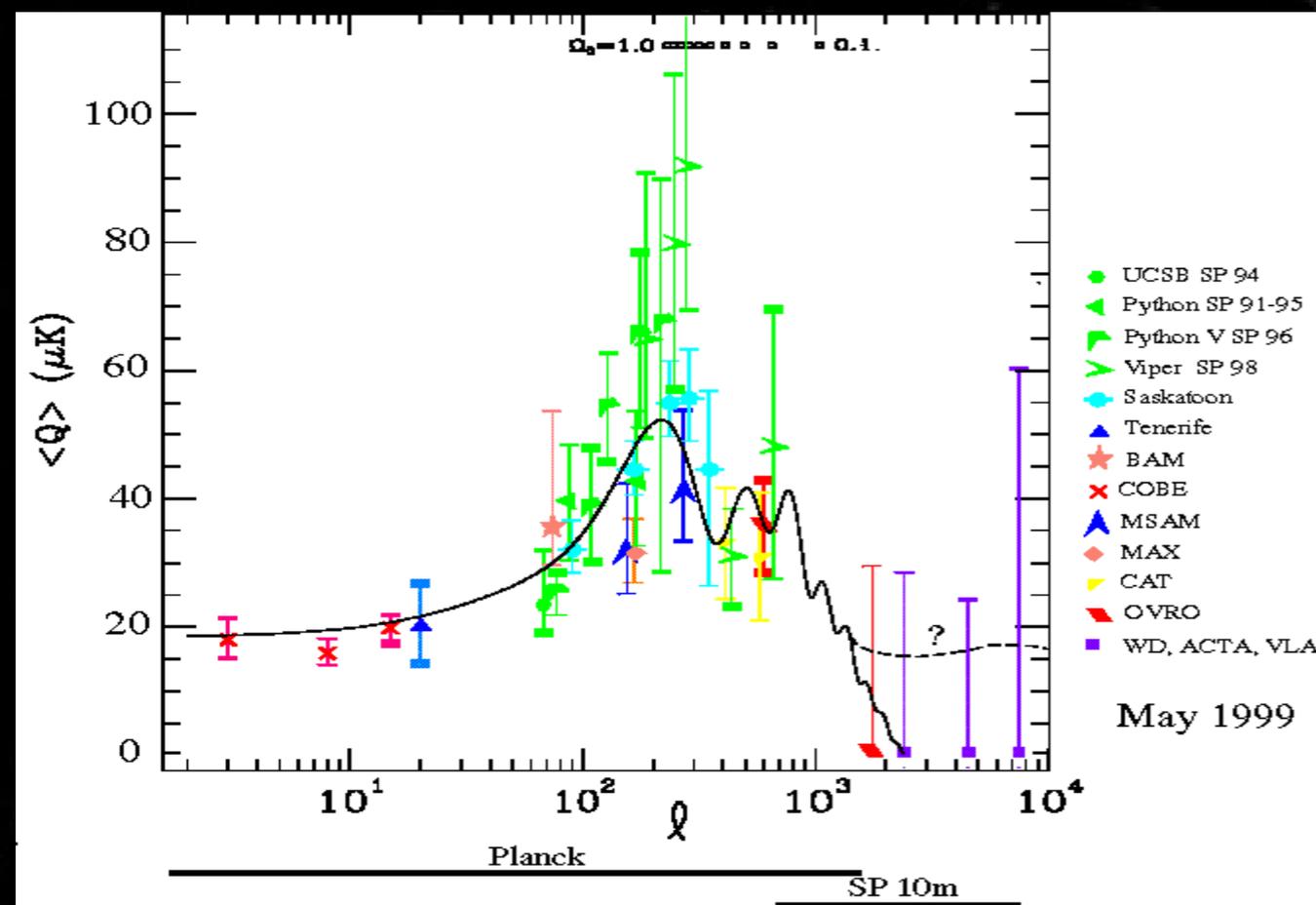


Amplitude des structures en fonction de leur taille angulaire

# Résultats de Planck



# 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

*"Polarization of Light"*  
UCLA Department of Physics and Astronomy

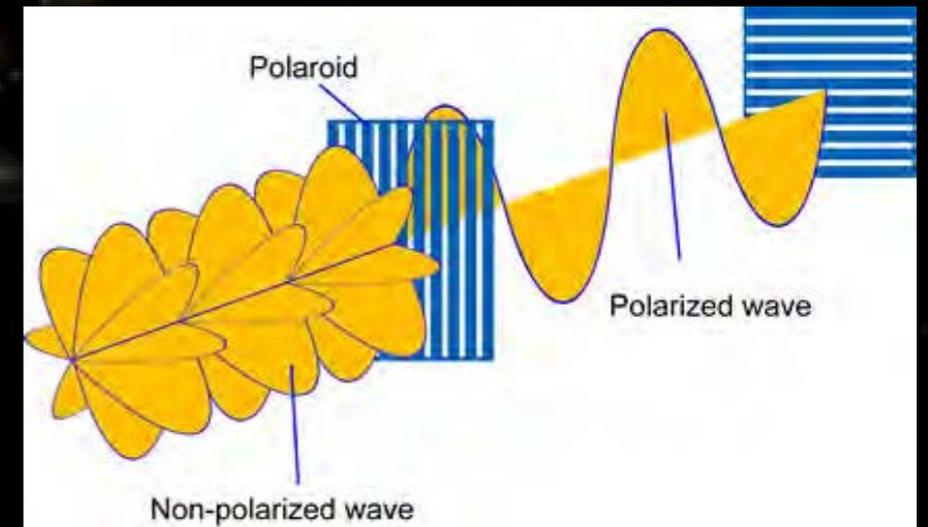


*"Polarization of Light"*  
UCLA Department of Physics and Astronomy



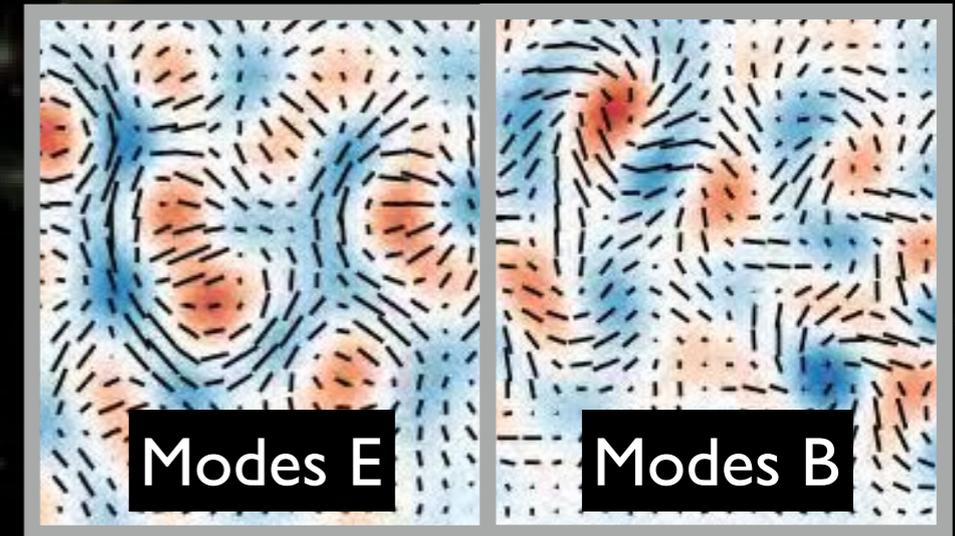
# Et maintenant ? Les modes-B de polarisation du CMB !!

- La polarisation du fond diffus: immense source d'information
  - ★ Modes E: complémentaires à la Température
  - ★ Modes B: seule fenêtre sur la phase d'inflation
- Inflation ( $\sim 10^{-35}$  s):
  - ★ Brève phase d'expansion accélérée (facteur  $\sim e^{60}$ )
  - ★ Résout plusieurs paradoxes du modèle standard
    - Platitude
    - Horizon
    - Origine des perturbations primordiales (CMB, Galaxies...)
- Recherche active des modes B
  - ★ « Smoking gun for inflation » !!
  - ★ Fausse alerte en 2013: BICEP2: majoritairement de la poussière Galactique (montré par Planck)
  - ★ Stay tuned !!



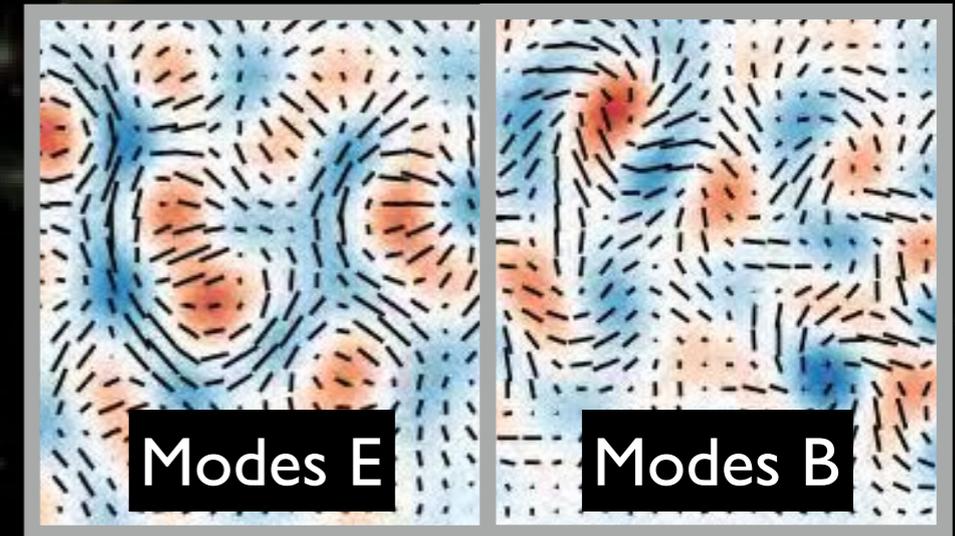
# Et maintenant ? Les modes-B de polarisation du CMB !!

- La polarisation du fond diffus: immense source d'information
  - ★ Modes E: complémentaires à la Température
  - ★ Modes B: seule fenêtre sur la phase d'inflation
- Inflation ( $\sim 10^{-35}$  s):
  - ★ Brève phase d'expansion accélérée (facteur  $\sim e^{60}$ )
  - ★ Résout plusieurs paradoxes du modèle standard
    - Platitude
    - Horizon
    - Origine des perturbations primordiales (CMB, Galaxies...)
- Recherche active des modes B
  - ★ « Smoking gun for inflation » !!
  - ★ Fausse alerte en 2013: BICEP2: majoritairement de la poussière Galactique (montré par Planck)
  - ★ Stay tuned !!

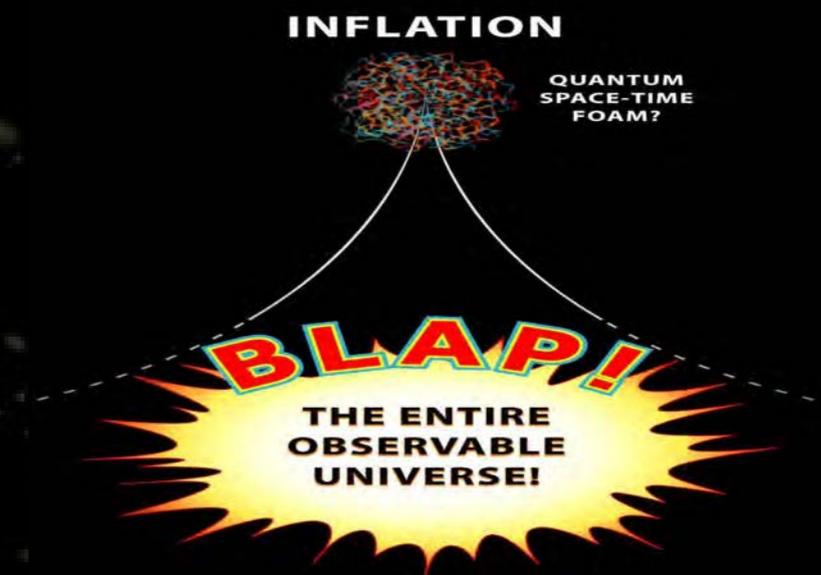


# Et maintenant ? Les modes-B de polarisation du CMB !!

- La polarisation du fond diffus: immense source d'information
  - ★ Modes E: complémentaires à la Température
  - ★ Modes B: seule fenêtre sur la phase d'inflation



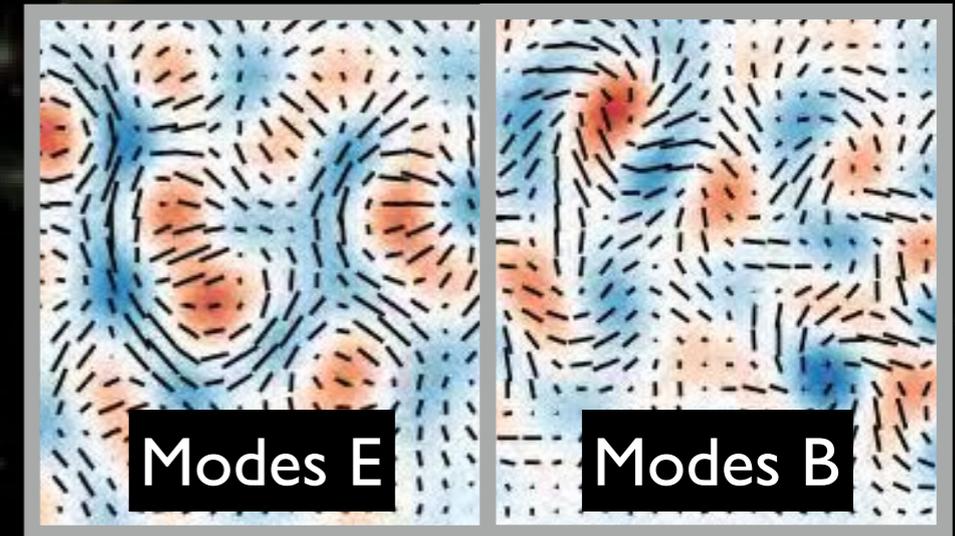
- Inflation ( $\sim 10^{-35}$  s):
  - ★ Brève phase d'expansion accélérée (facteur  $\sim e^{60}$ )
  - ★ Résout plusieurs paradoxes du modèle standard
    - Platitude
    - Horizon
    - Origine des perturbations primordiales (CMB, Galaxies...)



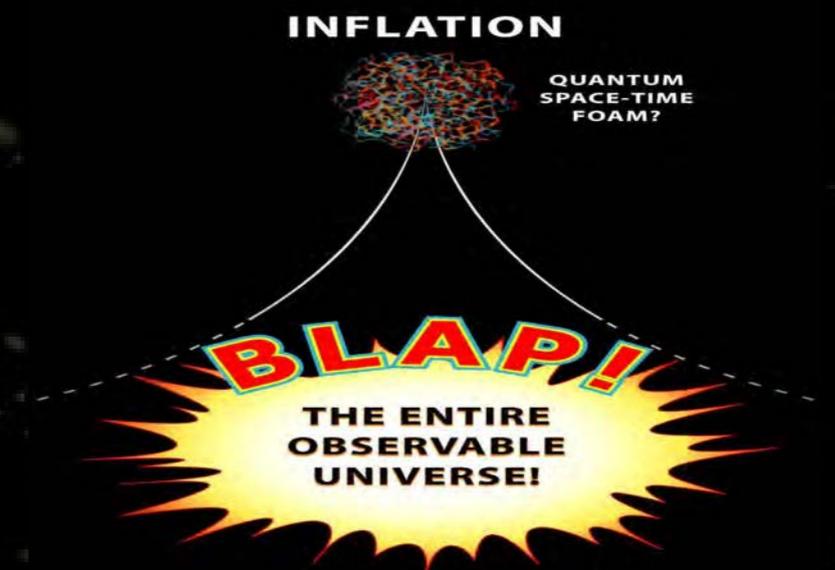
- Recherche active des modes B
  - ★ « Smoking gun for inflation » !!
  - ★ Fausse alerte en 2013: BICEP2: majoritairement de la poussière Galactique (montré par Planck)
  - ★ Stay tuned !!

# Et maintenant ? Les modes-B de polarisation du CMB !!

- La polarisation du fond diffus: immense source d'information
  - ★ Modes E: complémentaires à la Température
  - ★ Modes B: seule fenêtre sur la phase d'inflation



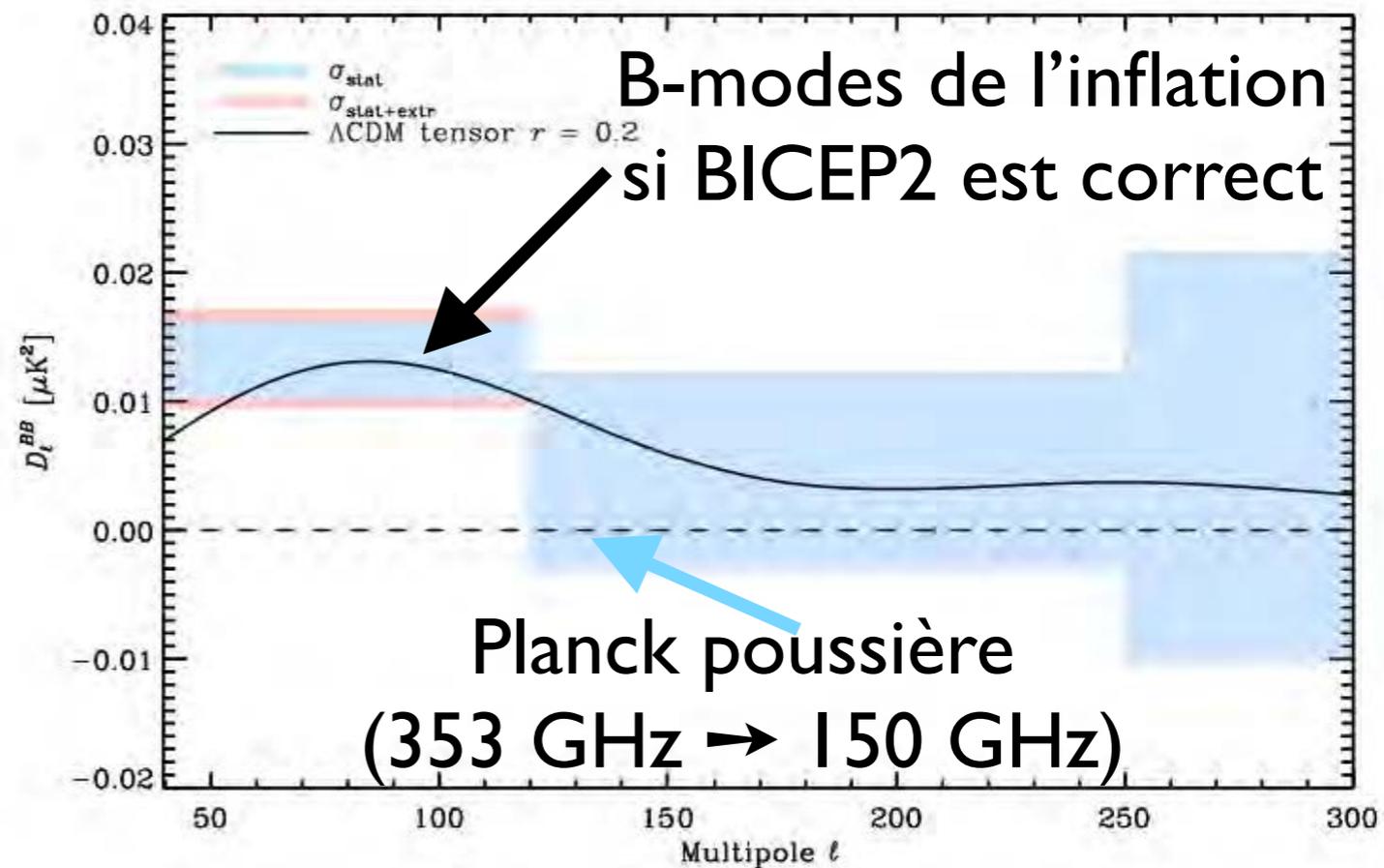
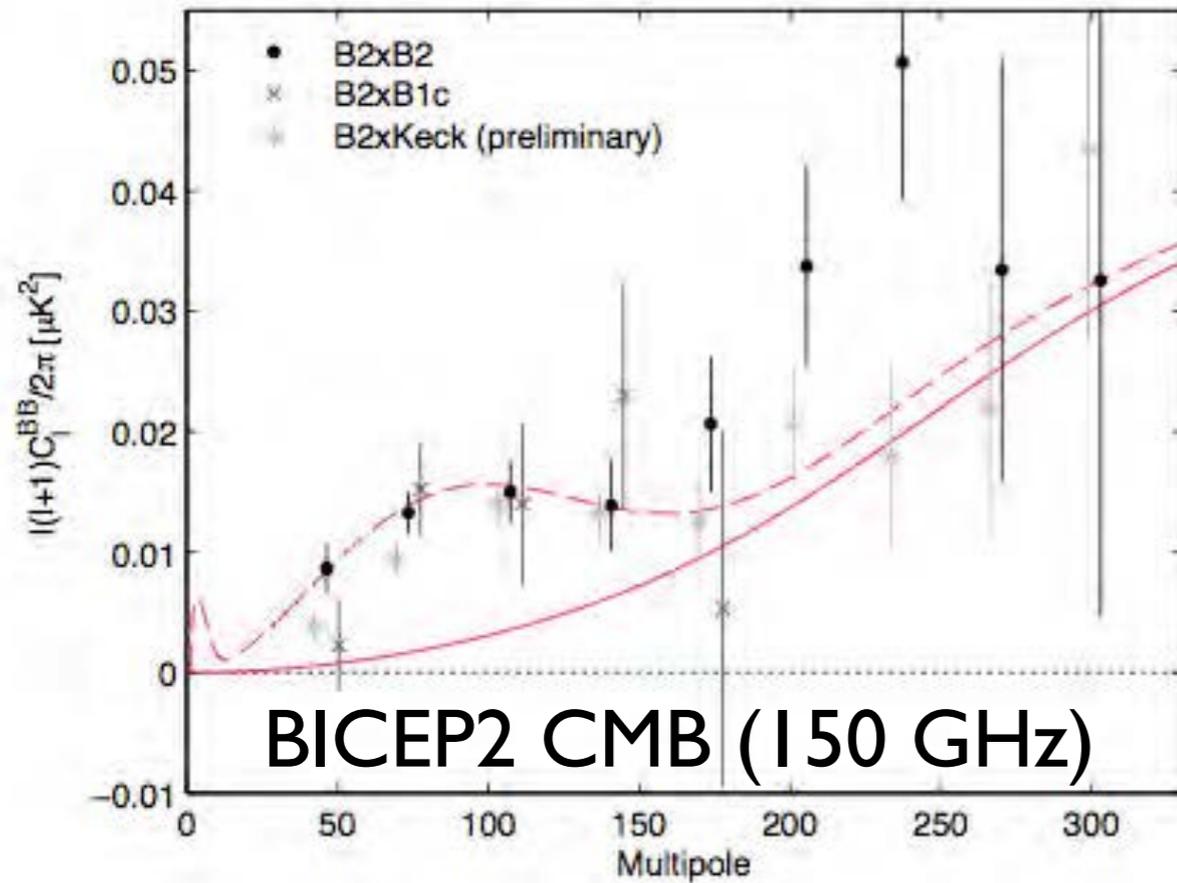
- Inflation ( $\sim 10^{-35}$  s):
  - ★ Brève phase d'expansion accélérée (facteur  $\sim e^{60}$ )
  - ★ Résout plusieurs paradoxes du modèle standard
    - Platitude
    - Horizon
    - Origine des perturbations primordiales (CMB, Galaxies...)



- Recherche active des modes B
  - ★ « Smoking gun for inflation » !!
  - ★ Fausse alerte en 2013: BICEP2: majoritairement de la poussière Galactique (montré par Planck)
  - ★ Stay tuned !!



# Et maintenant ? Les modes-B de polarisation du CMB !!



## ● Recherche active des modes B

- ★ « Smoking gun for inflation » !!
- ★ Fausse alerte en 2013: BICEP2: majoritairement de la poussière Galactique (montré par Planck)
- ★ Stay tuned !!



# 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  $\Lambda$ 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...

