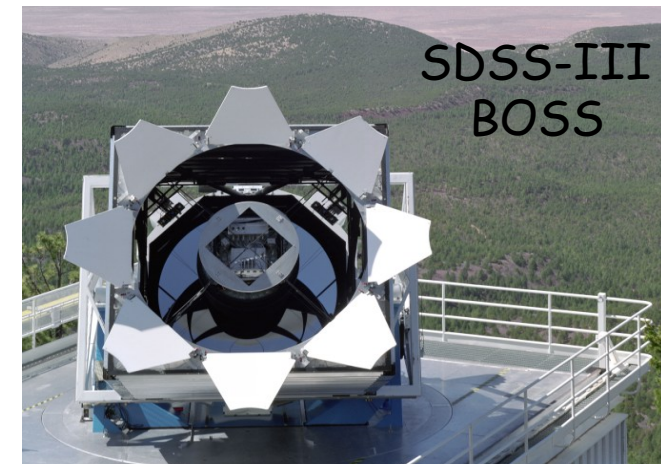
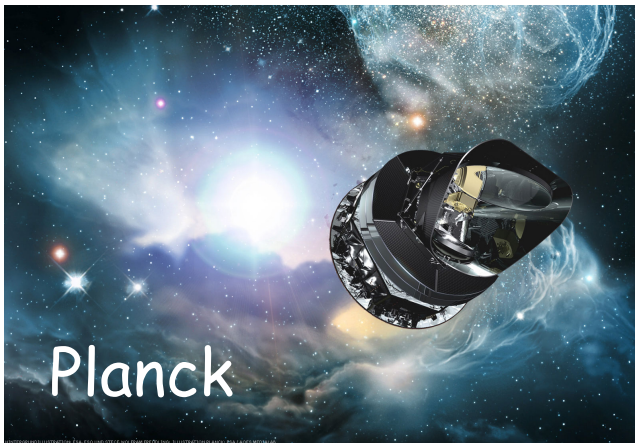


L'Energie Noire

Christophe Yèche (CEA-Saclay, Irfu)



- La révolution de la fin du XX^{ième} siècle en cosmologie
- Les supernovae: SNLS
- Le fond diffus cosmologique: Planck
- Les oscillations baryoniques acoustiques: BOSS

22^{ième} congrès de la SFP, Marseille, le 4 juillet 2013

Univers en expansion



Loi de Hubble

- Plus une galaxie est loin de nous, plus elle semble nous fuir

$$V = H_0 d$$

- Mesure des vitesses des galaxies par leur **décalage vers le rouge (z)**

Effet Doppler : $V/c = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = z$

- z croit \Rightarrow Remonter le temps

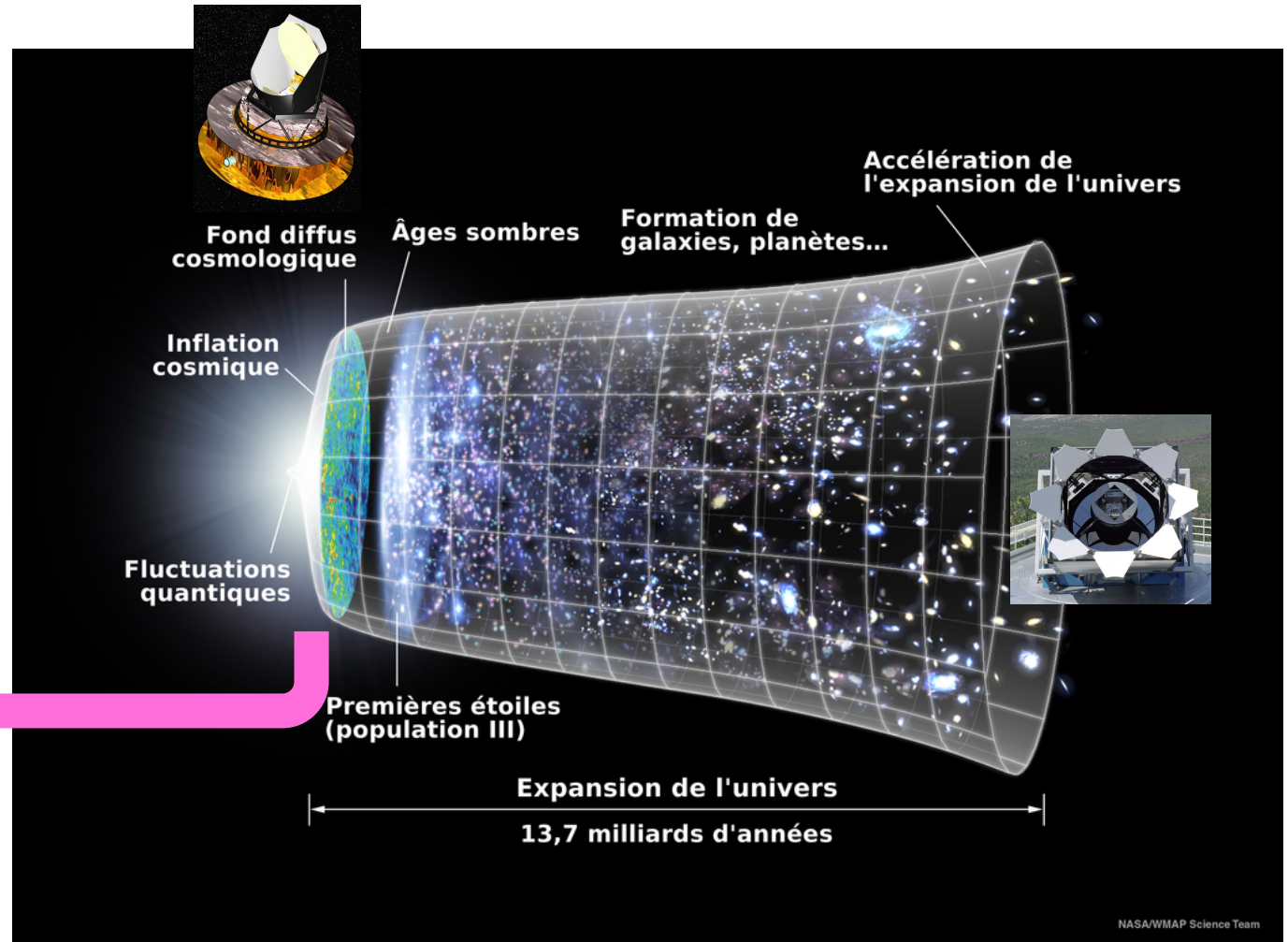
Que fait la gravitation?

- Elle va freiner l'expansion de l'univers
- L'expansion de l'univers devrait décélérer....



Le Big-Bang

$\sim 10^{-10}$ - 10^{-5} s
Particules
élémentaires
⇒ LHC

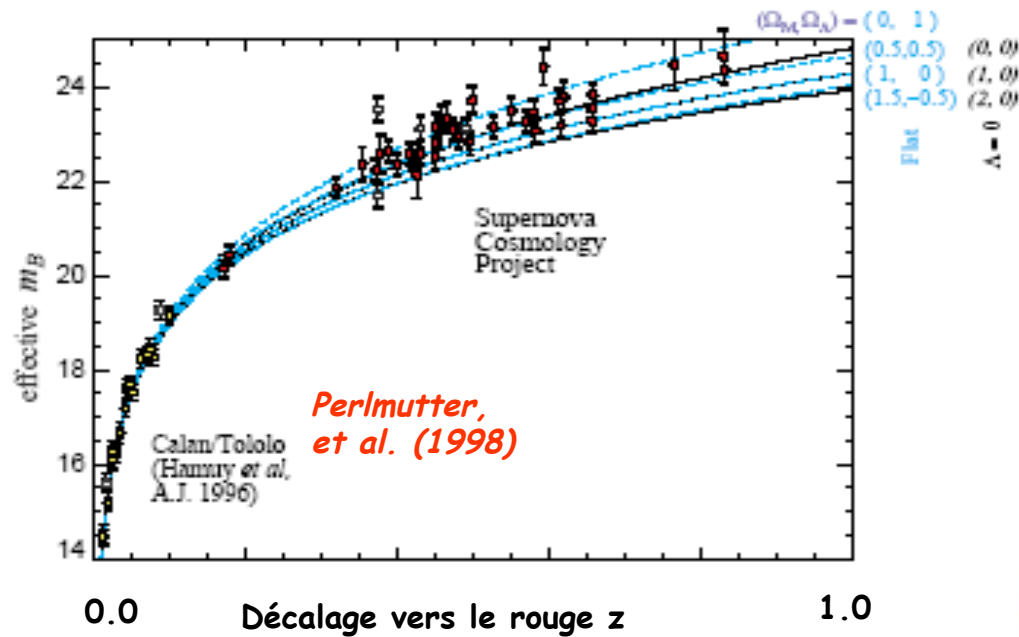


- L'univers en expansion se refroidit progressivement
- 3mns : Fin de la nucleo-synthèse
- 380 000 ans: Recombinaison : l'univers devient transparent

Révolution en cosmologie

Découverte avec les supernovae

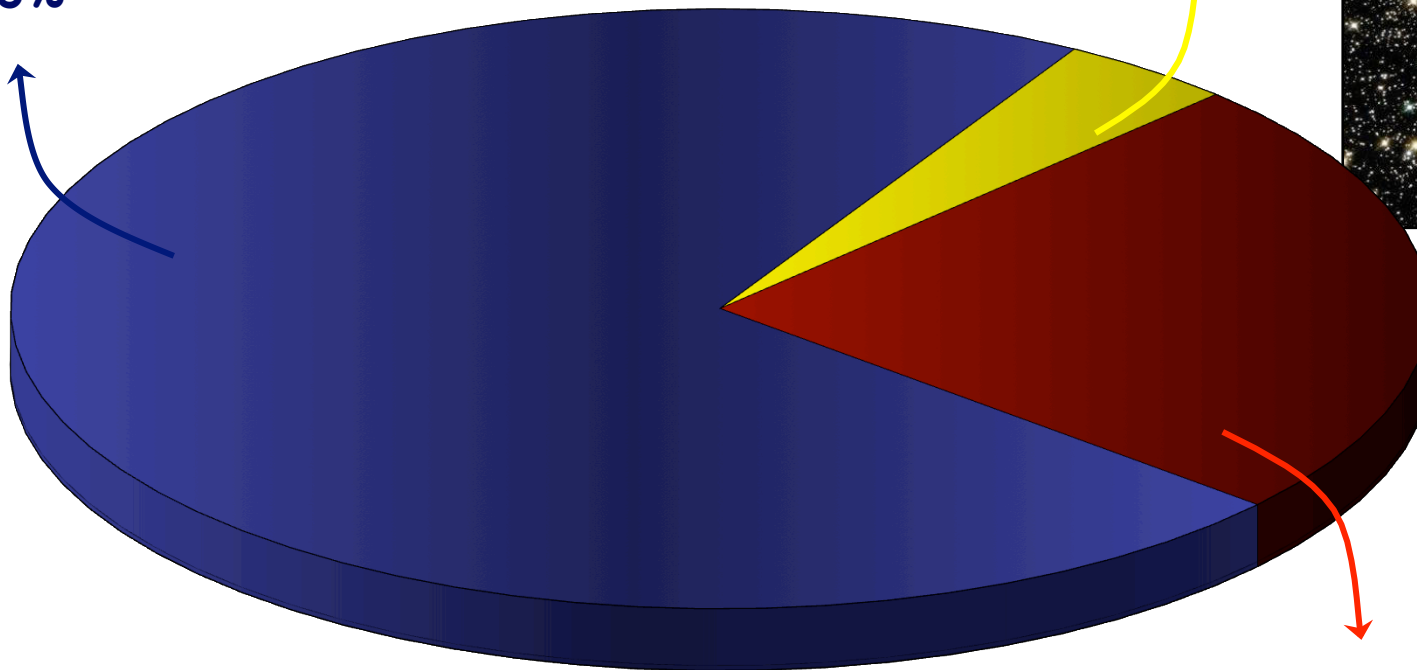
- **En 1998**, diagrammes de Hubble (magnitude $\leftrightarrow z$) avec des chandelles standards (SN Ia)
- Accélération de l'expansion de l'Univers



- **~3/4 d'énergie noire** répulsive vis à vis de la gravitation
- **~1/4** de matière « classique »

Notre univers

Energie noire
73%



Matière ordinaire
4%



Matière noire
23%

Les supernovae

SNLS

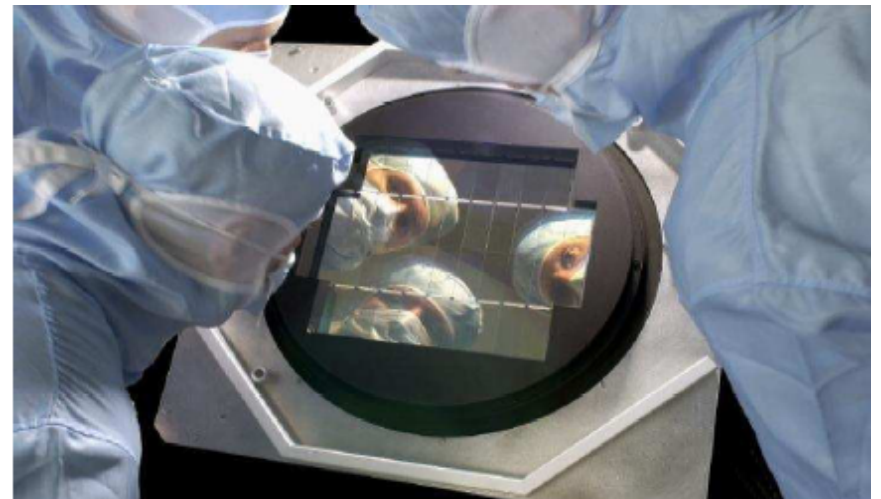




SNLS: SuperNova Legacy Survey

MegaCam:

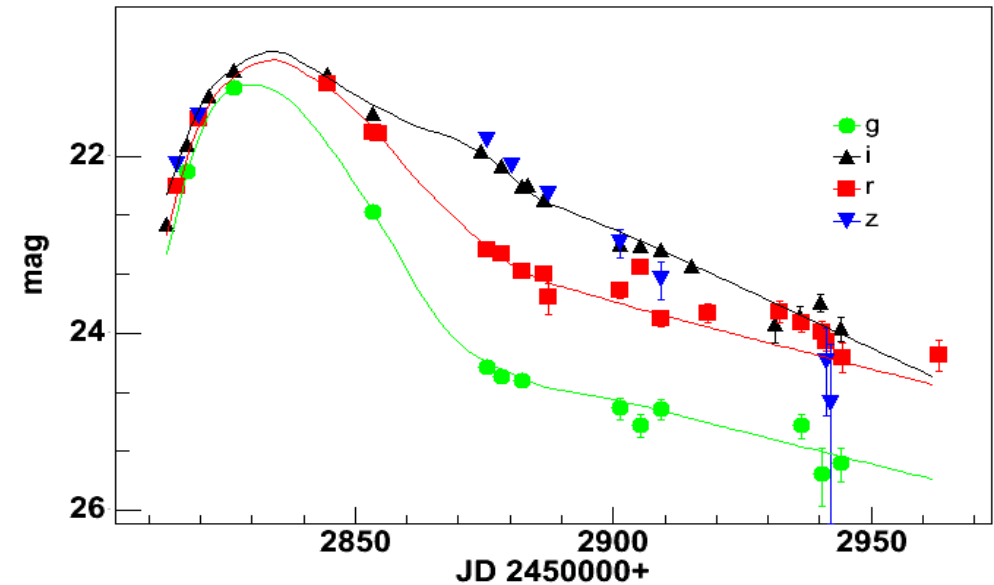
- Conçue et construite par le CEA
- Plus grande camera CCD au monde jusqu'en 2010:
 - 36 CCD 2k × 4.5k pixels.
- Grand champ: 1 deg²



SNLS:

- Télescope de 3.6m (CFHT) à Hawaï équipé avec **MegaCam**
- 400 SN Ia attendues (2003-2008)

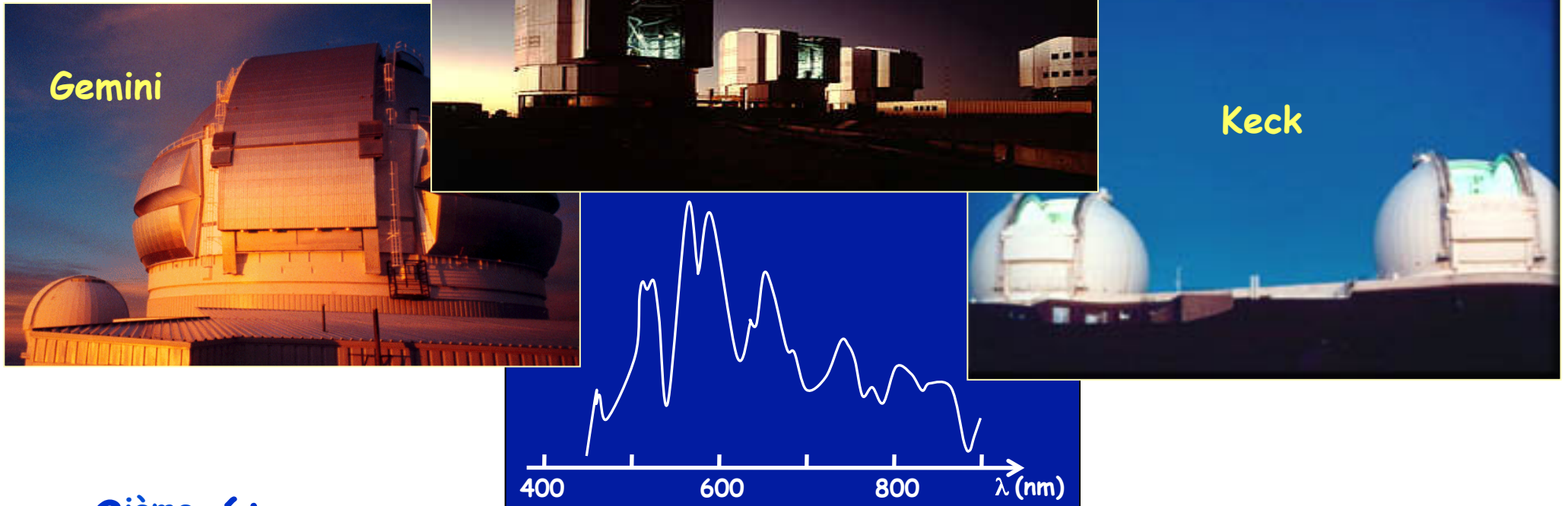
SNLS: La méthode



1^{ère} étape

- Mesure du flux de photons tous les 3/4 jours
- Détection en temps réel des SN

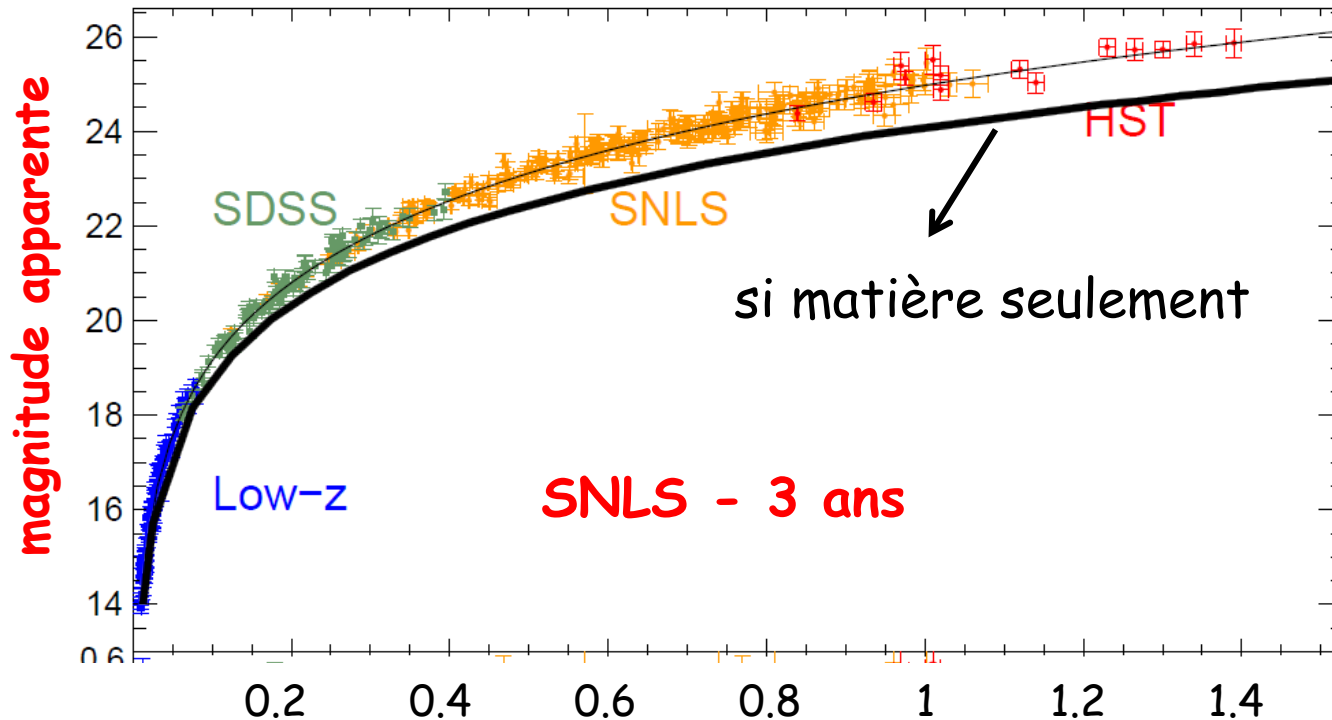
SNLS: La méthode



2^{ème} étape

- Observation du spectre de la SN avec des télescopes de 8 m (VLT, Keck, Gemini...)
- Confirmation du type de la SN (Ia, Ib..)
- Mesure du z (décalage vers le rouge)

SNLS: Résultats

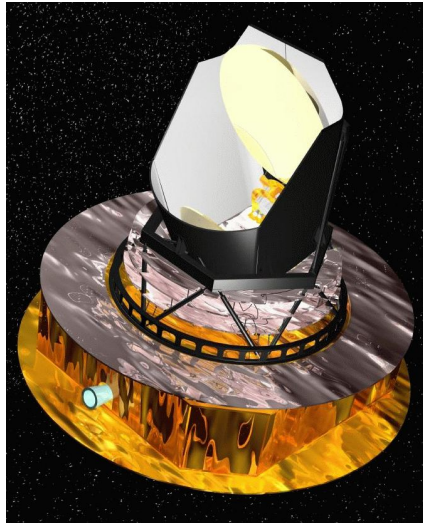


Résultats avec 3 ans d'observation

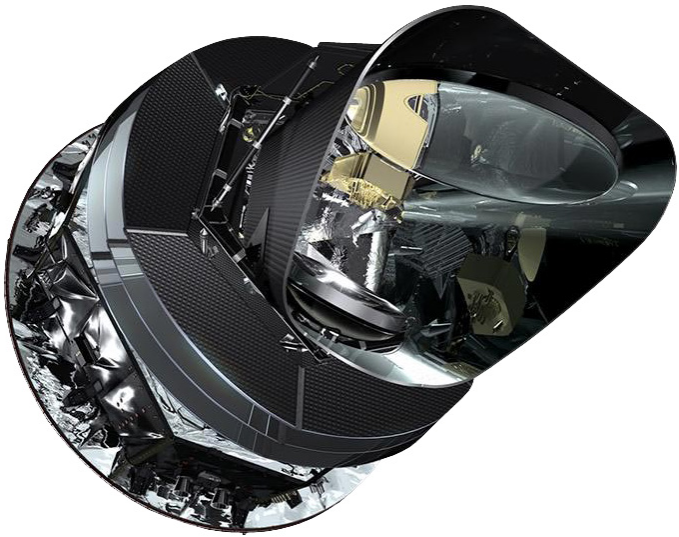
- **242 SN Ia** découvertes et confirmées par la spectroscopie
- Au total, avec les autres programmes : ~500 SNIa
- SNLS confirme l'existence de l'énergie noire et donne **fraction d'énergie noire = $73\% \pm 1.5\%$**
- La chasse aux SNs continue avec 5 ans d'observation!!!

Fond diffus cosmologique

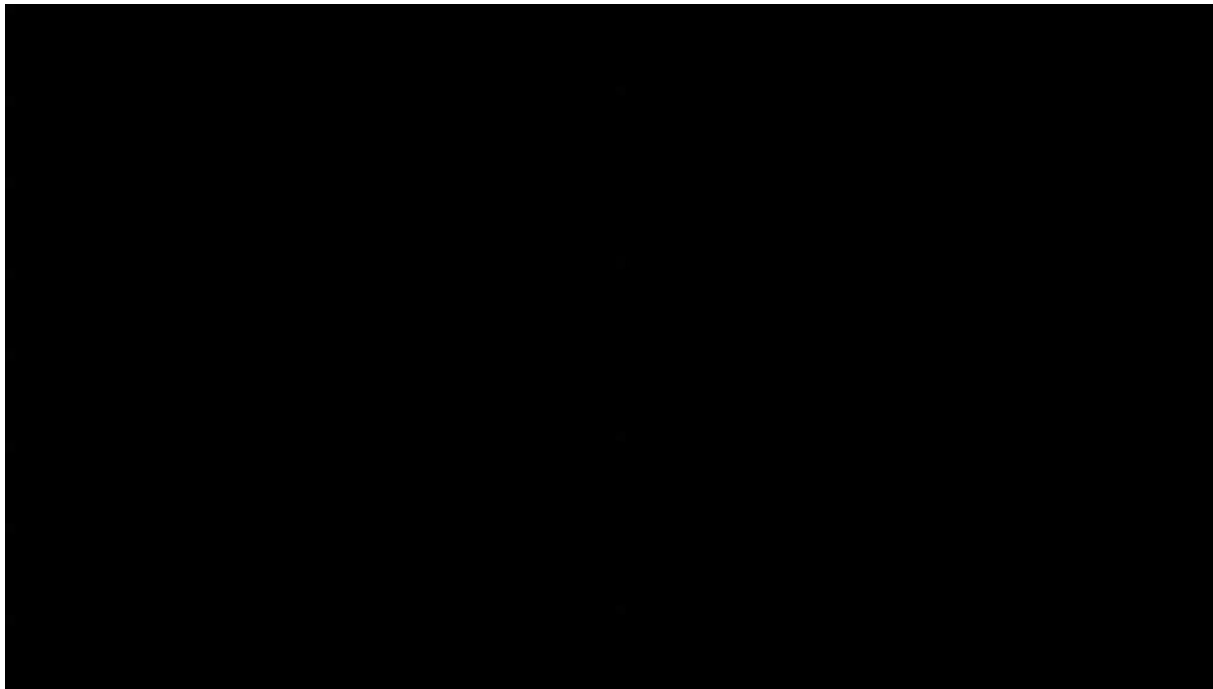
Satellite Planck



Planck: *Nouvel éclairage sur le FDC*

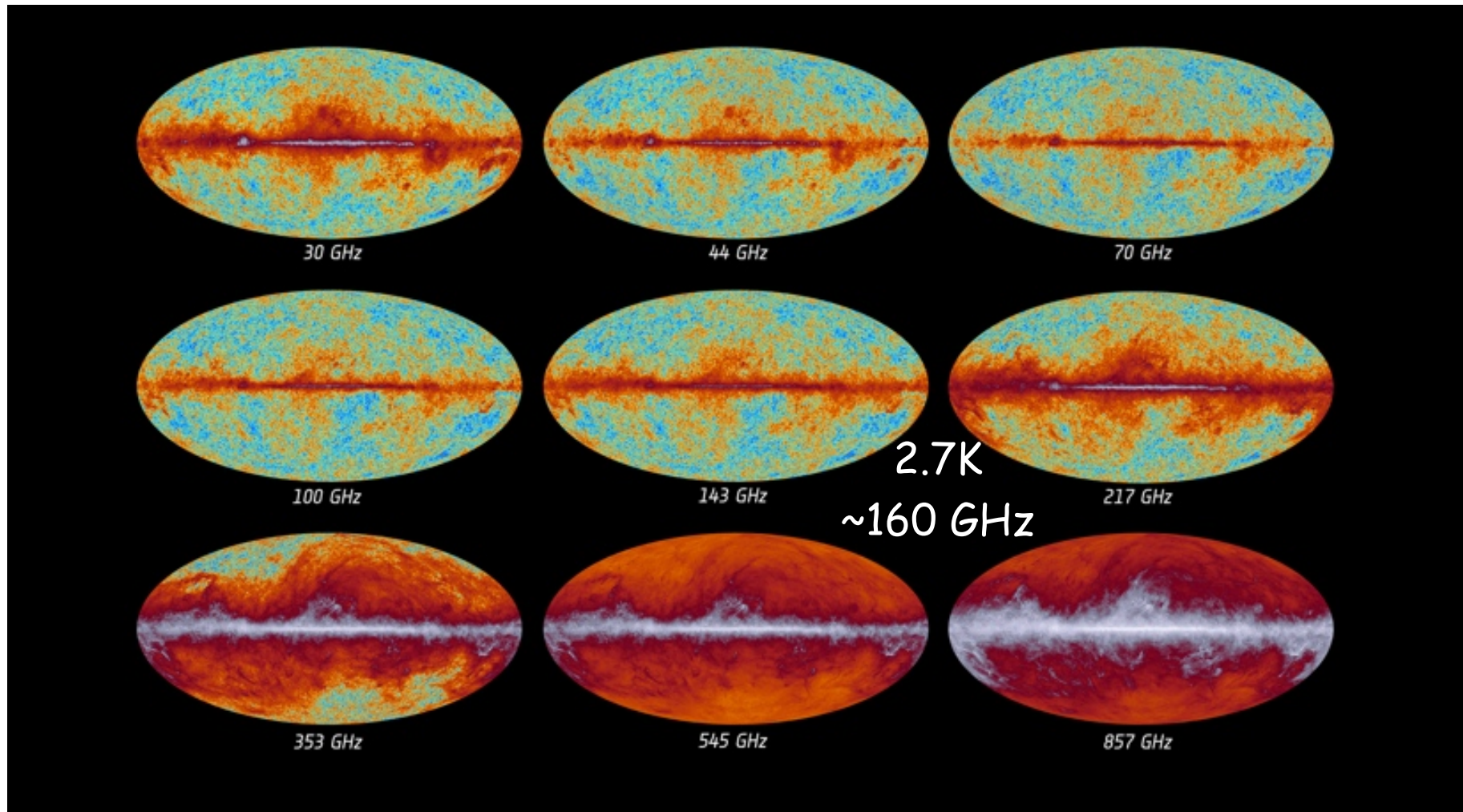


- Satellite ESA/CNES lancé en mai 2009 vers L2 (1.5 M km de la terre)
- Mesurer les variations $T_{\text{FDC}}=2.7\text{K}$ à 1/100 000
- Bolomètres refroidis à 0.1 K
- ~3 ans d'observation
- Premiers résultats en mars 2013



Cartes du Fond Diffus Cosmologique

- Neuf observations du ciel à différentes fréquences.
- Séparation des différentes composantes (FDC, poussières galactiques, bruit expérimental...).



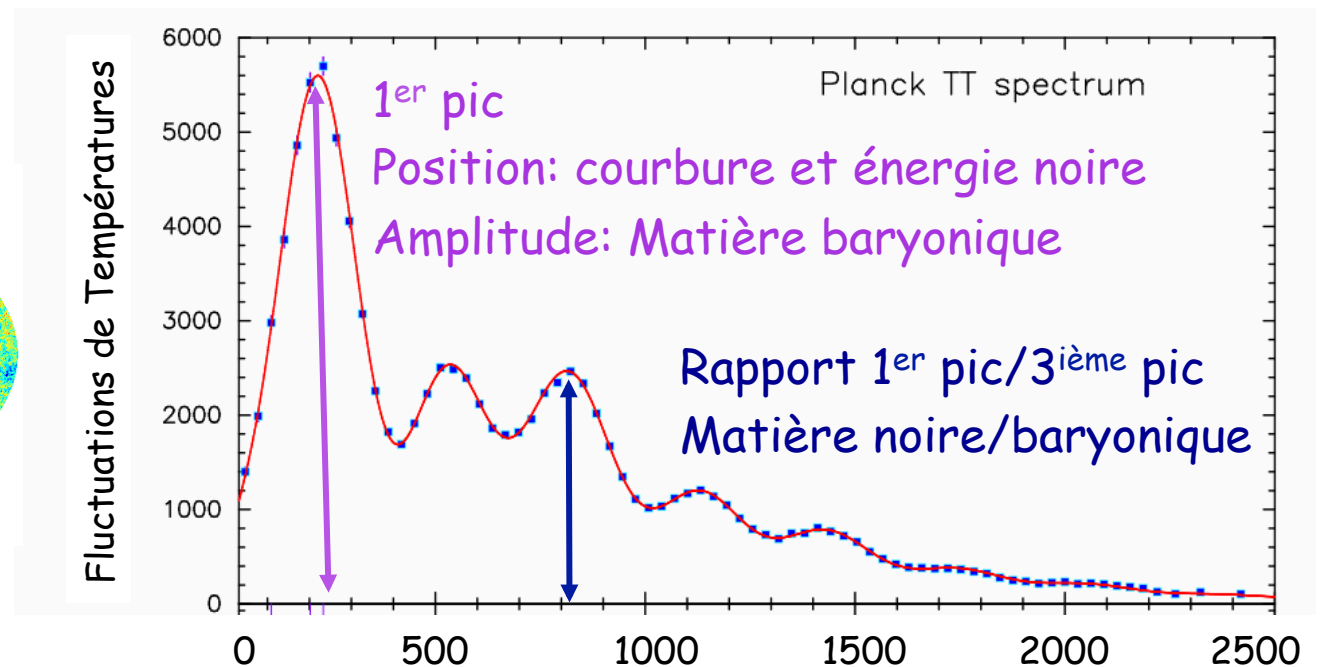
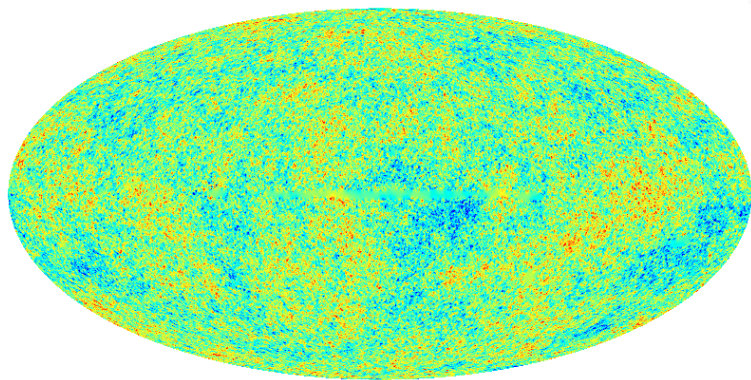
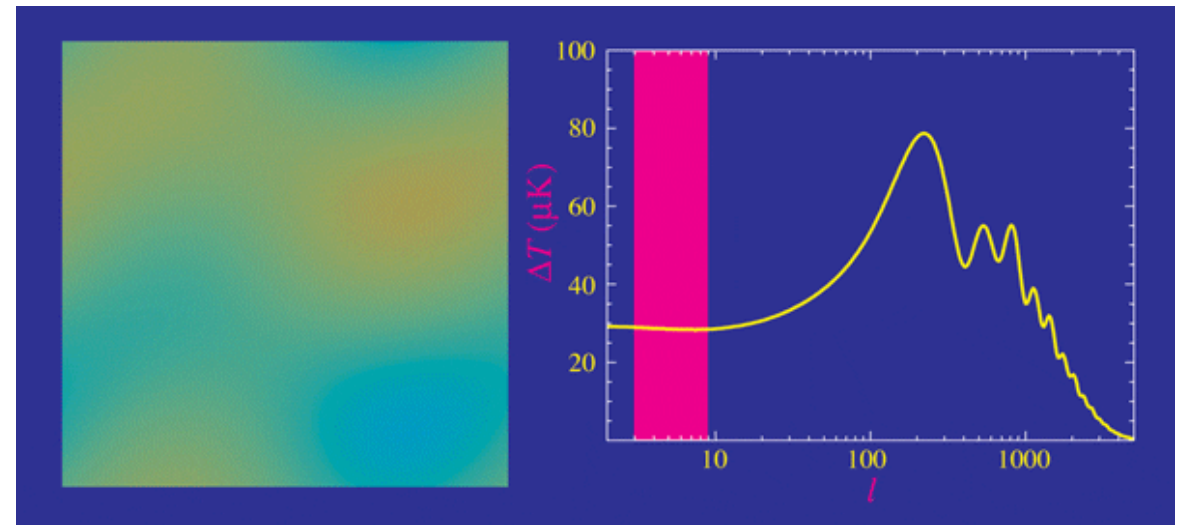
Que nous disent ces cartes?

Anisotropies du FDC

➤ Taille angulaire des fluctuations

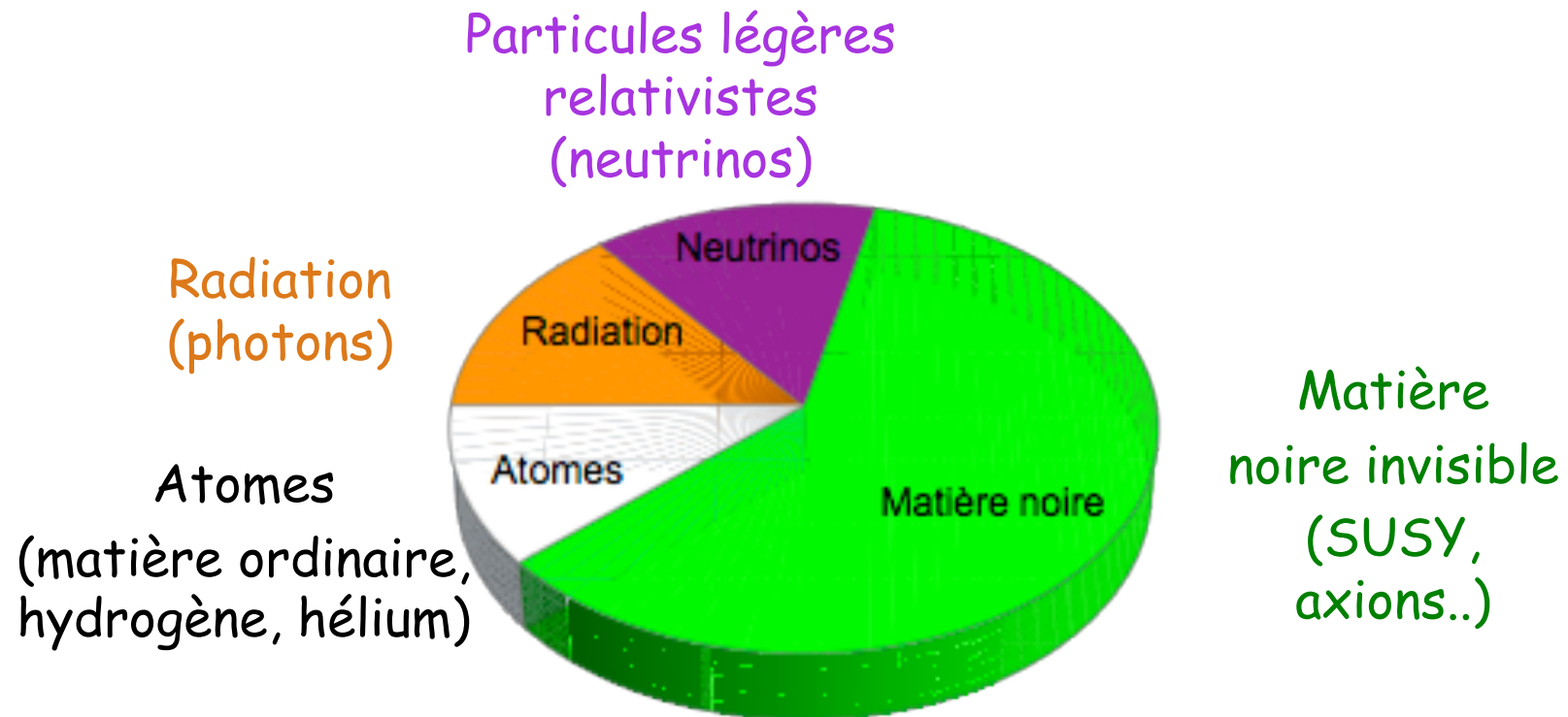
➤ Conversion : angle

$\theta \rightarrow$ multipôle $l = 180^\circ/\theta$



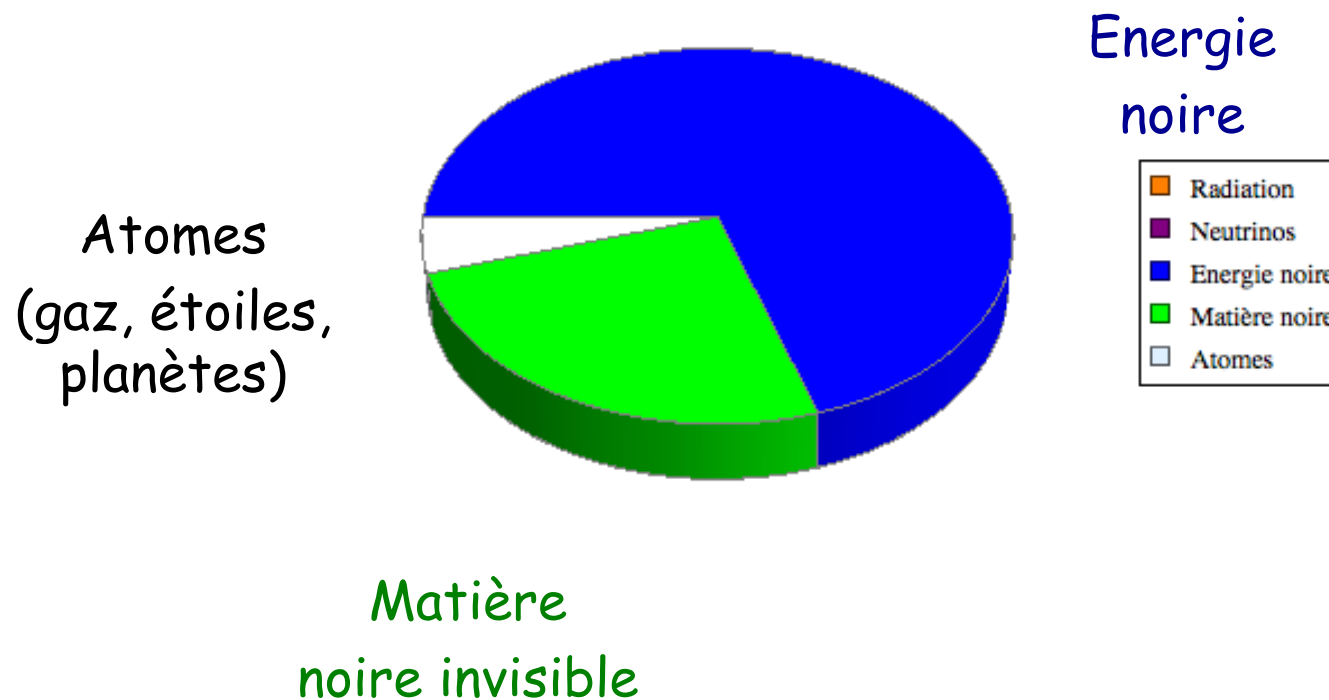
Contenu de l'univers vu par Planck

➤ A partir du spectre de puissance (oscillations acoustiques), on en déduit la composition de l'univers quand il avait 380 000 ans.



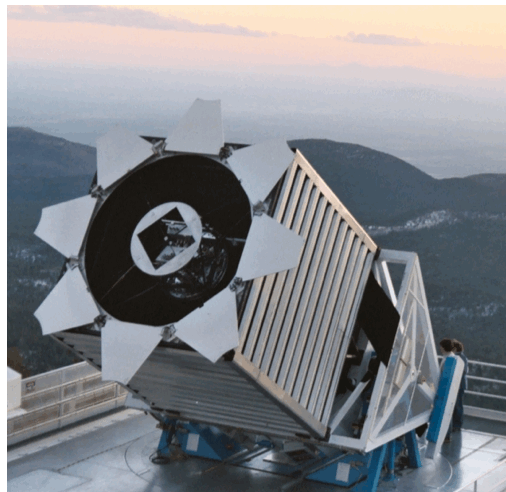
L'univers de Planck à nos jours

- A partir de l'équation d'Einstein, on prédit l'évolution du contenu énergétique de l'Univers
- On retrouve le contenu mesuré par les supernovae

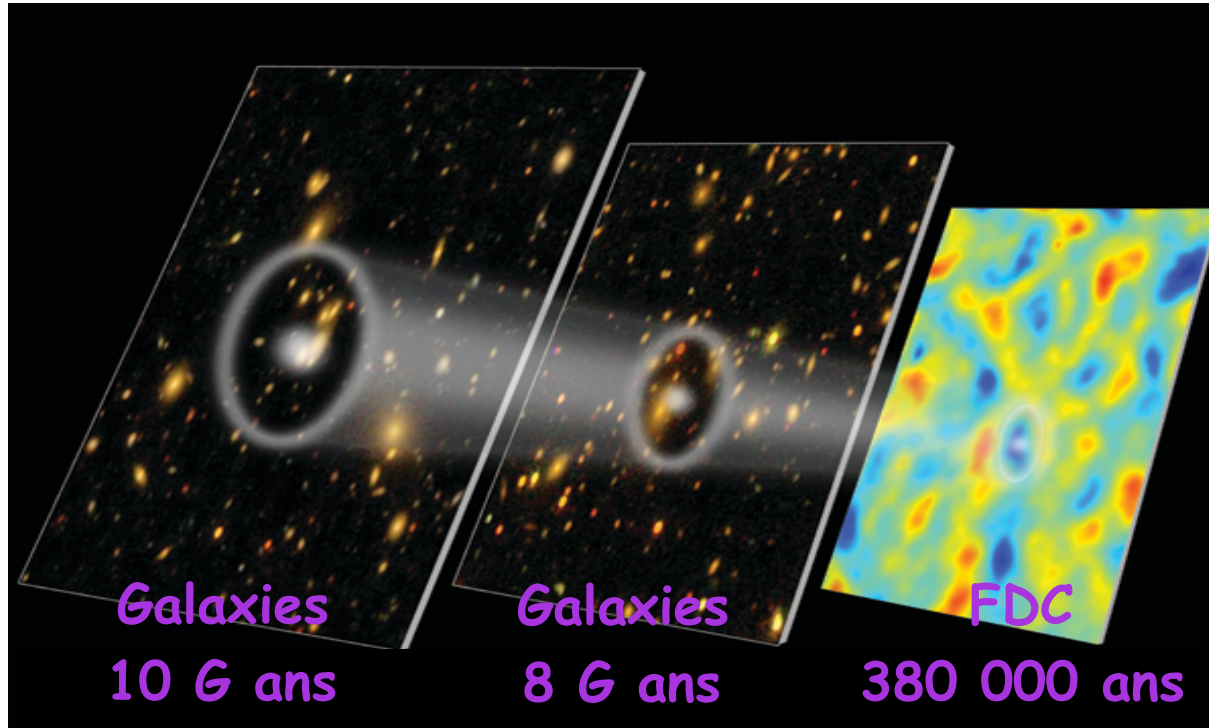


Les oscillations baryoniques acoustiques

BOSS



Du FDC aux galaxies



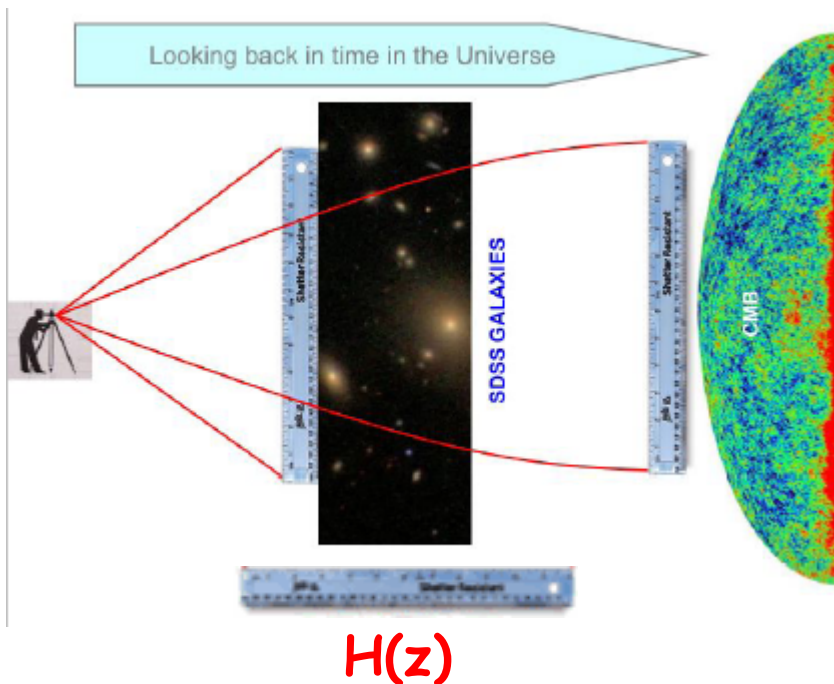
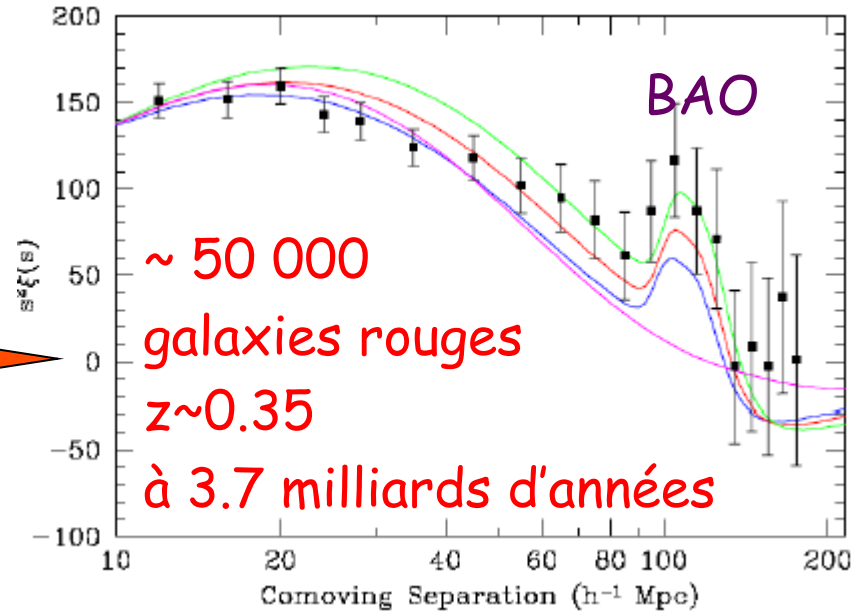
Propagation acoustique d'une surdensité:

- Ondes acoustiques au sein du plasma (baryons, électrons, photons).
- Les perturbations de baryons et photons évoluent ensemble jusqu'à la recombinaison (380 000 ans).
- Ensuite, le rayon de la surdensité de baryons se « fixe » à 105 Mpc/h.
- Les galaxies se forment dans ces coquilles de surdensité de 105 Mpc/h.

Oscillations baryoniques acoustiques

Empreinte dans l'Univers:

- Les galaxies ne sont pas réparties uniformément
- En 2005: premières observations d'un pic à $\sim 105 \text{ Mpc}/h$

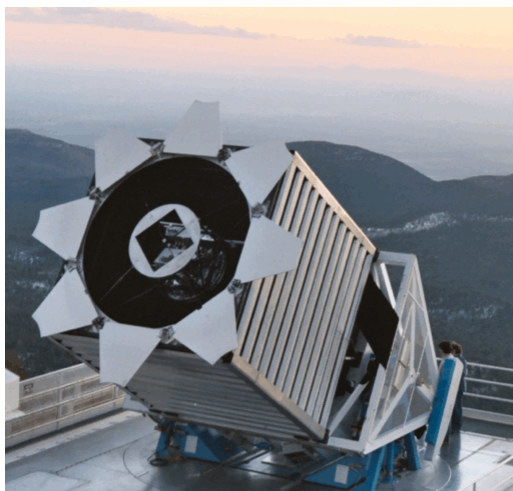


SNIa : « Chandelles standards »

BAO : « Règle standard »

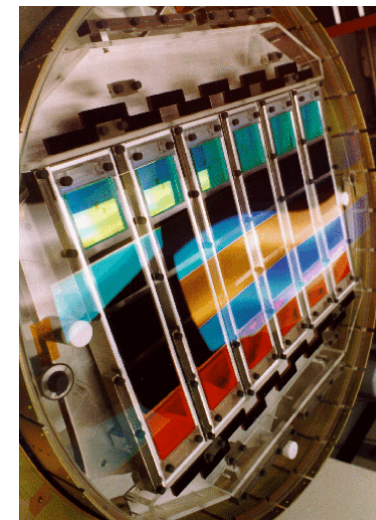
- Distorsions de la règle dans les 2 directions
- **Mesure de $H(z)$ le long de z**

BOSS



Le relevé SDSS

- Télescope Sloan avec un grand champ focal $\sim 7 \text{ deg}^2$
- Position x, y : Caméra avec 5 filtres
- Position z : Spectrographe ~ 1000 spectres simultanés



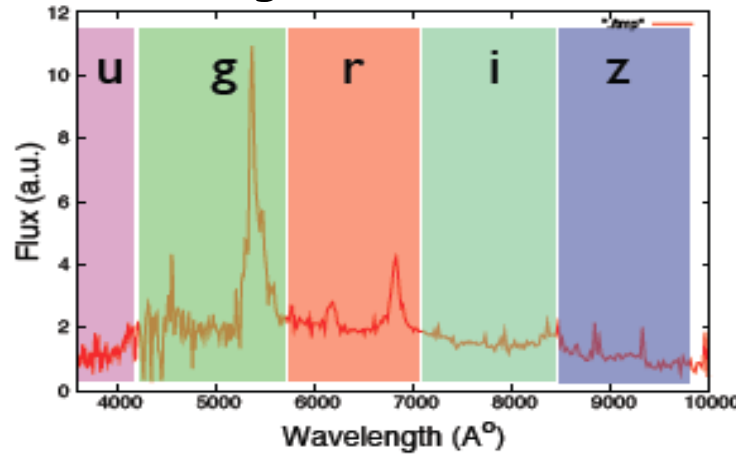
Le projet BOSS

- 1.5 millions de galaxies rouges à 6 milliards d'années de nous
- Utilisation des phares les plus lointains de l'univers: 150 000 quasars à 11 milliards d'années



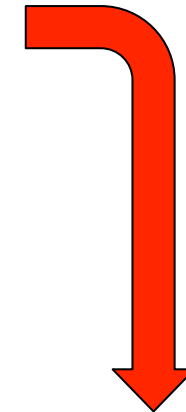
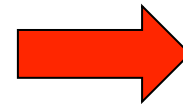
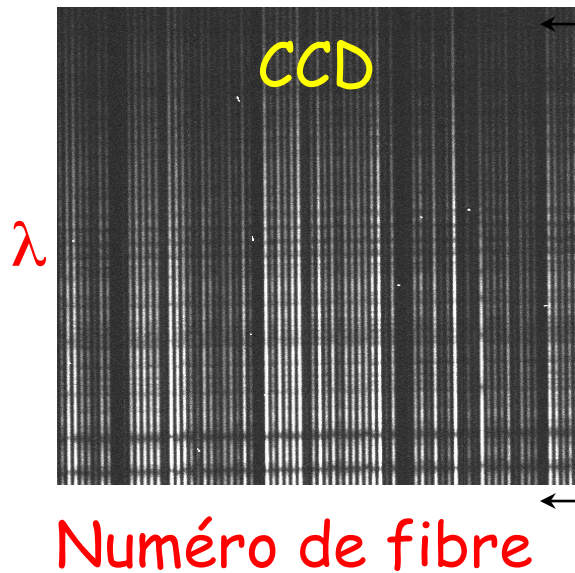
Les observations dans BOSS

Images en 5 bandes



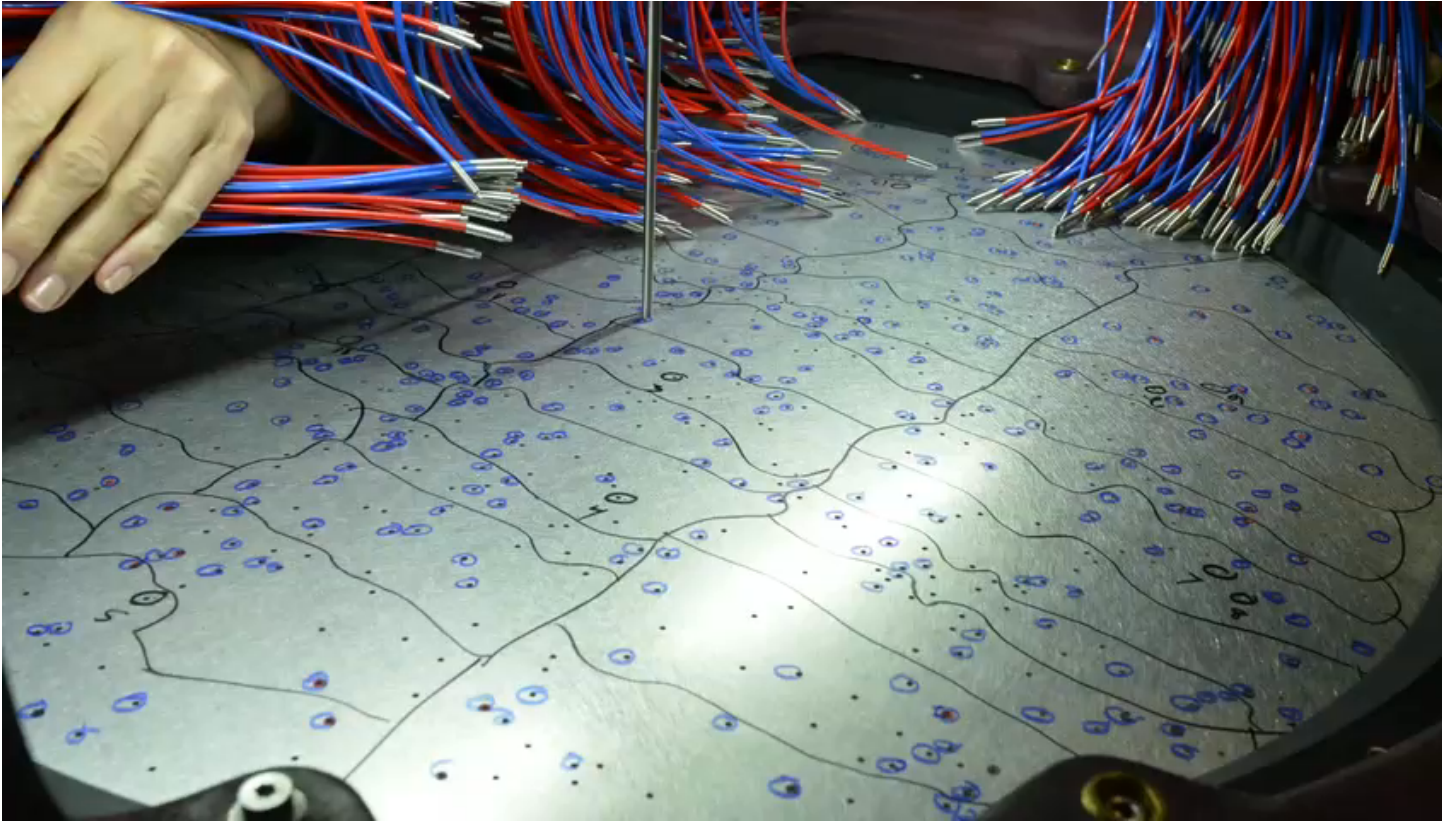
Listes des cibles

SDSS J112253.51+005329.8
SDSSp J120441.73-002149.6
SDSSp J130348.94+002010.4
SDSSp J141205.78-010152.6
SDSSp J141315.36+000032.1



1000 Fibres optiques

Plug and Play



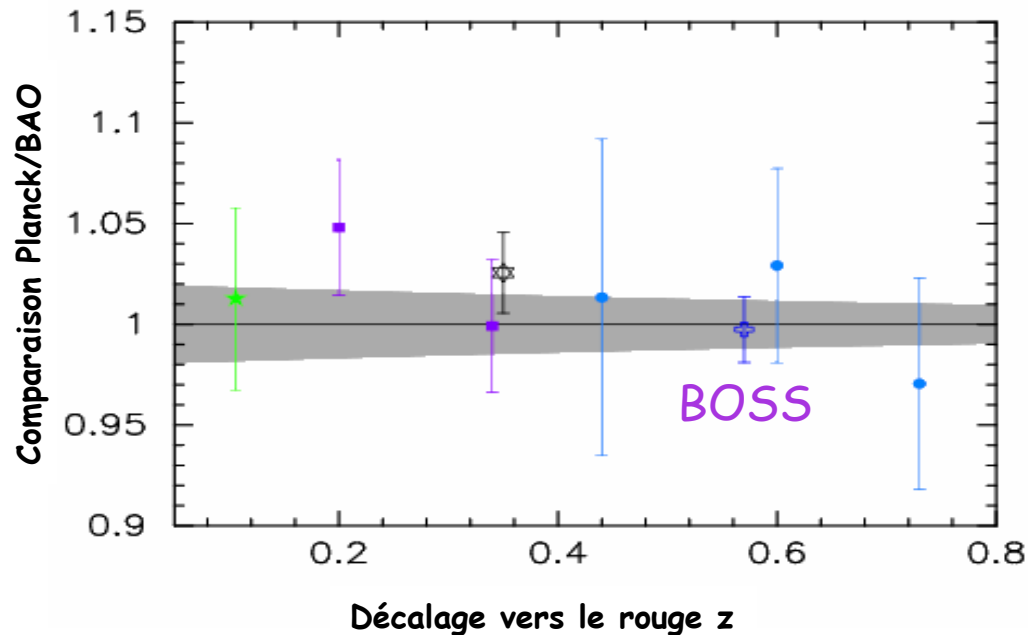
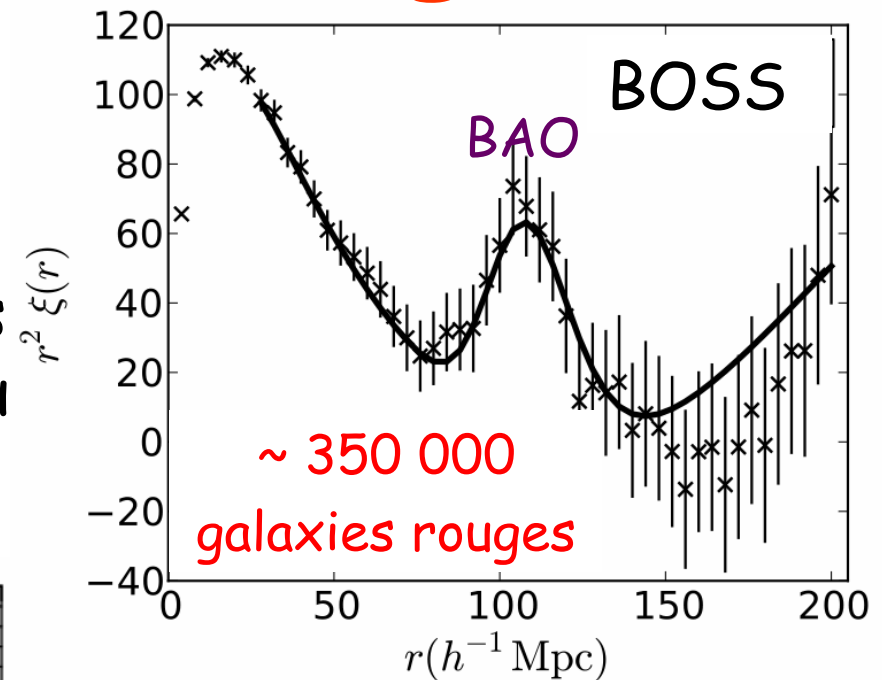
Plusieurs étapes (~3 mois)

- Sélections des objets (~ 40 quasars deg^{-2} et ~ 150 galaxies deg^{-2})
- Perçage des plaques (1000 trous par plaque)
- Connexions des fibres sur la plaque pendant la journée
- 5 à 9 plaques observées par nuit

L'empreinte dans les galaxies

Premiers résultats en 2012

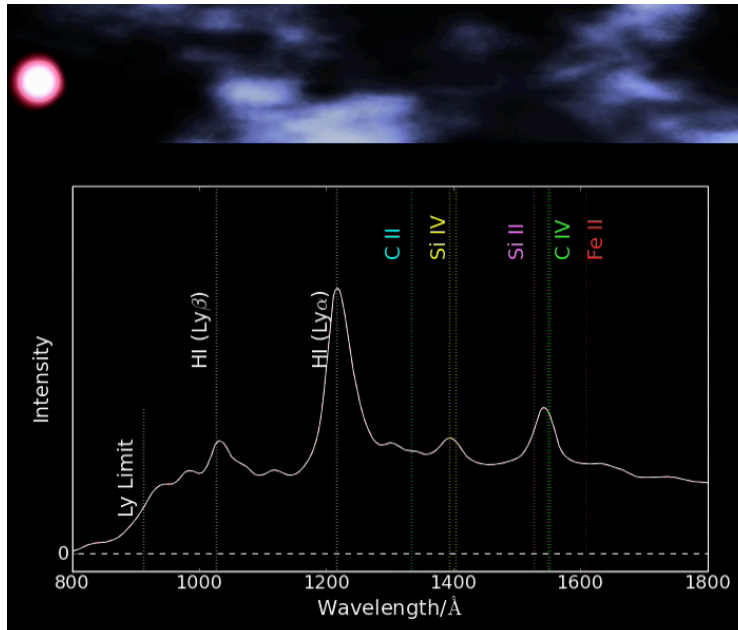
- 1/3 du programme final
- Décalage vers le rouge $z \sim 0.6$
- À ~5 milliards d'années de nous
- Confirmation sans ambiguïté du pic BAO



Accord avec Planck

- Position du pic au bon endroit
- Accord parfait entre la description de l'Univers il y a 13.4 milliards d'années et il y a quelques milliards d'années

Chercher la matière dans l'IGM

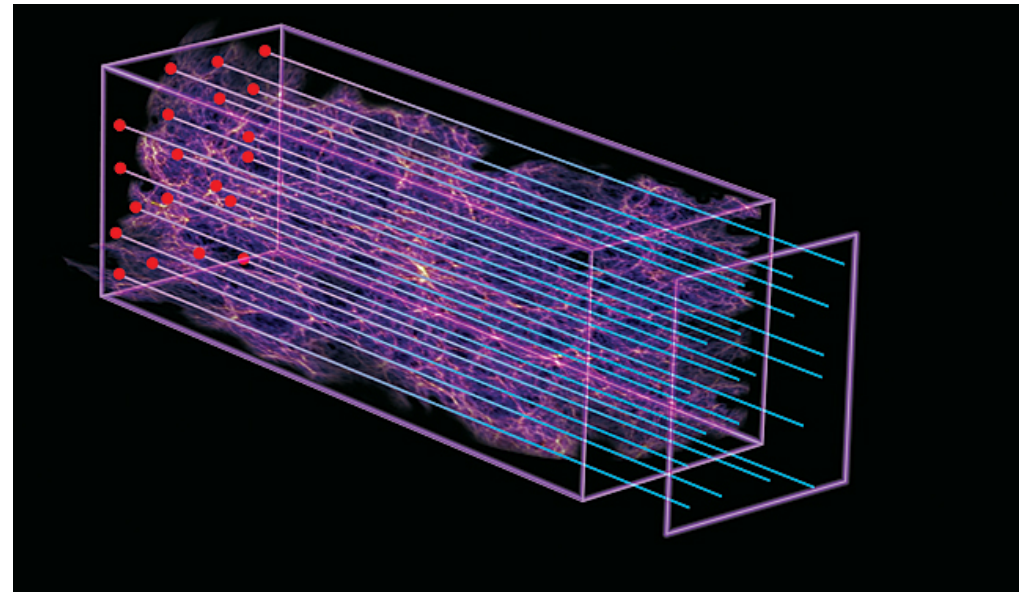


Principes

- Quasars: Phares à 11 milliards d'années
- Lumière traverse le milieu intergalactique
- Raie d'absorption quand la lumière traverse un nuage d'hydrogène

Détection des BAO

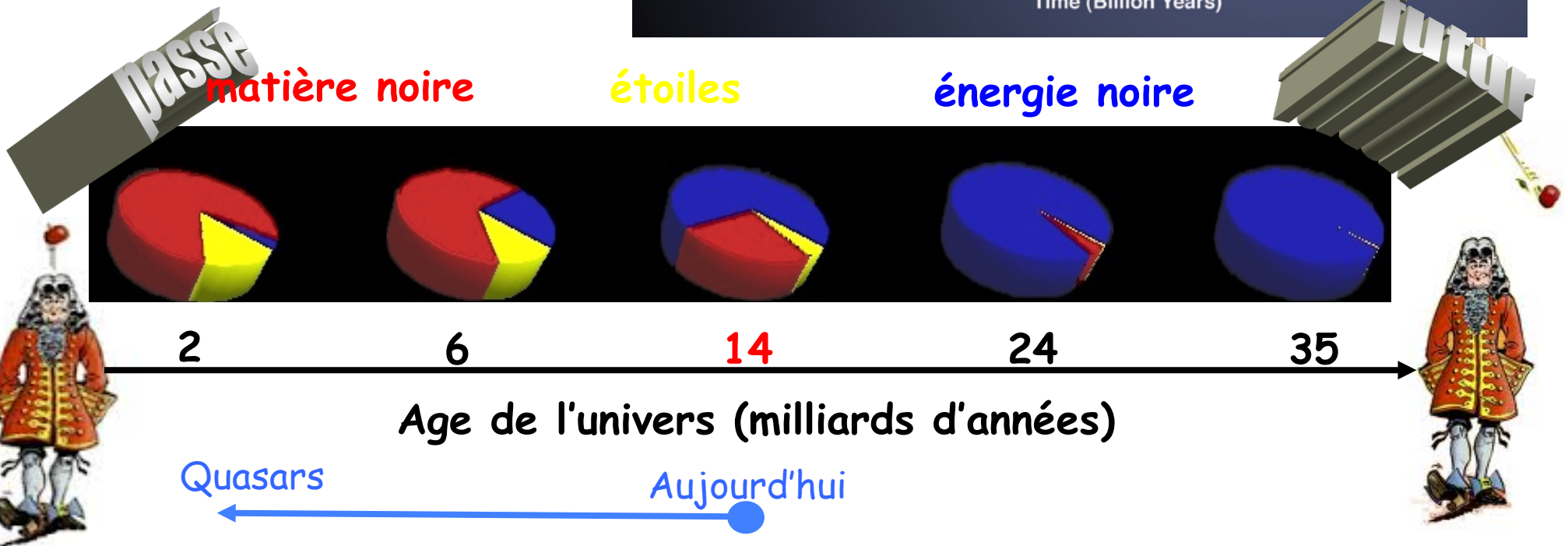
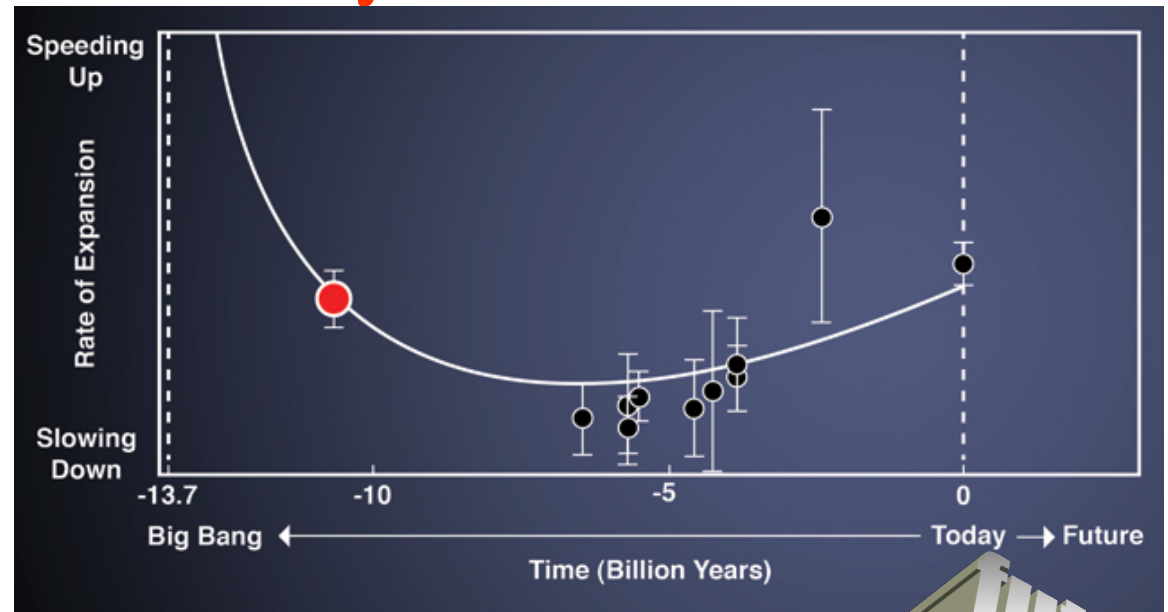
- Reconstruction à 3D des raies d'absorption
- On retrouve la même distance caractéristique
- Mesure du paramètre de Hubble il y a 11 milliards d'années



Univers décéléré puis accéléré

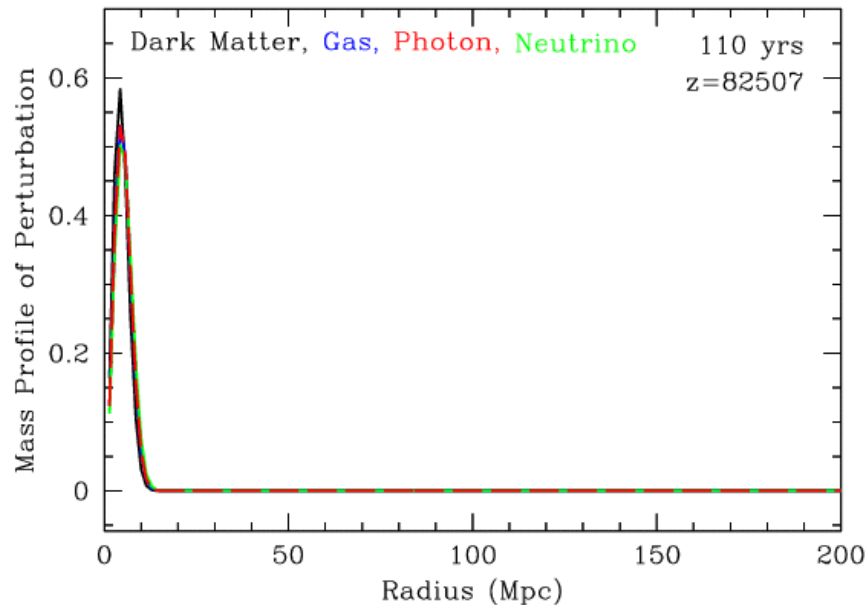
Mesure de l'expansion

- Univers dominé par la matière
- Univers en phase de décélération



*Pour
en savoir plus ...*

Oscillations baryoniques acoustiques: BAO



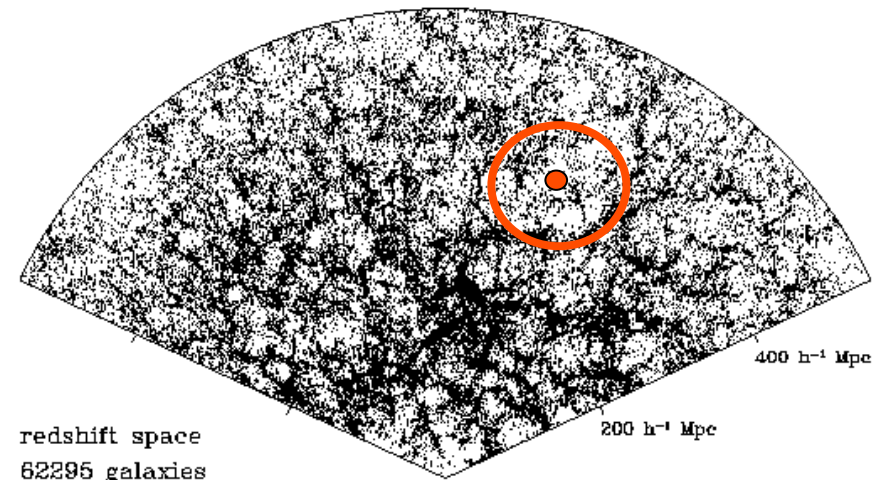
Propagation acoustique d'une surdensité:

- Onde acoustique au sein du plasma (baryons, électrons, photons).
- Les perturbations de baryons et photons évoluent ensemble jusqu'au découplage ($z \sim 1100$).
- Ensuite, le rayon de la surdensité de baryons se « fixe » à 150 Mpc.

Distance caractéristique:

- Les galaxies se forment dans ces coquilles de surdensité de 150 Mpc.
- Pour tous z , excès du nombre de galaxies pour $r \sim 150$ Mpc (en coordonnées comobiles).

⇒ Règle standard



Du fond diffus primordial aux BAO

