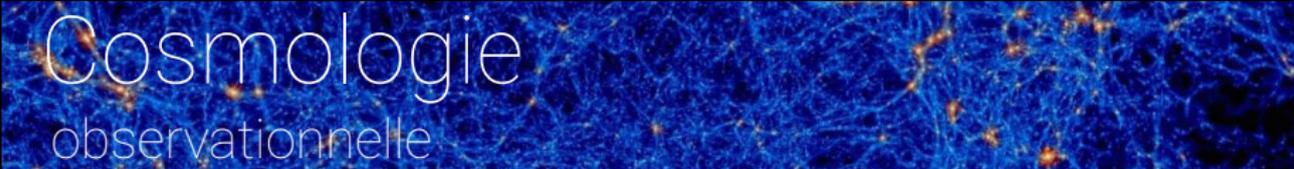


GILLARD William

A horizontal banner image showing a complex network of blue filaments and nodes, representing the cosmic web or large-scale structure of the universe. The nodes are highlighted in orange and yellow, suggesting galaxy clusters or individual galaxies.

# Cosmologie

observationnelle

16 juin 2016

# Cosmologie observationnelle : Qu'est-ce ?

C'est une branche de la physique dédié à **mesurer**, par des observations de **précisions**, la structure et la dynamique de l'Univers, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

## Un peu d'histoire

*De tout temps l'homme à observé le cosmos mais la cosmologie observationnelle devient une discipline scientifique à partir des année 1920.*

- 1927 :** **Lemaître** propose le modèle du Big-Bang et prédit l'expansion de l'Univers,
- 1920 :** **Hubble** repousse les limites du cosmos par ces recherches sur la structure et la dynamique de notre Univers :
  - ⇒ Découverte et mesure du redshift,
  - ⇒ Découverte de l'expansion de l'univers,
- 1964 :** **Pensias** et **Wilson** découvre le fond diffus cosmologique,
- 1992 :** **Mather** et **Smoot** mettent en évidence les fluctuations en température du fond diffus cosmologique,
- 1998 :** **Perlmutter**, **Schmidt** et **Riess** ont mis en évidence de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

# Cosmologie observationnelle : Une science à part.

## L'Univers, c'est quoi ?

- c'est l'ensemble des objets et des événements que l'on peut ou pourra observer,
- il est **unique**,
- il est **isolé**.

## Cosmologie observationnelle : une physique particulière

*La science dispose d'une multitude de systèmes physiques équivalent, dans des conditions différentes, pour déduire les lois de la physique.* Mais, pour la **Cosmologie**

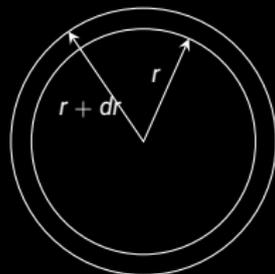
- L'Univers est unique, nous ne disposons pas d'autre Univers à comparer au notre,
- Nous observons l'Univers de l'intérieur, ce qui complique la tâche des cosmologues.

## Postulats cosmologiques :

- 1<sup>er</sup> Postulat Universalité des lois de la physique,
- 2<sup>nd</sup> Postulat Principe cosmologique : Aux grandes échelle l'Univers est **homogène** est **isotrope**.

# Finitude du temps ou de l'espace ?

Supposons l'Univers Statique et Infini. Chaque ligne de visée devrait aboutir sur une galaxie.  
 Dans ce cas *pourquoi le ciel nocturne n'est-il pas aussi brillant que le Soleil ?*



## Le paradoxe d'Olbers

- Le nombre d'étoile dans une coquille de rayon  $r$ , par rapport à la position due Soleil, et d'épaisseur  $dr$  est :  $dN = \rho \times 4\pi r^2 dr$
- Luminosité apparente de chacune des étoiles :  $\phi = \frac{L}{4\pi r^2}$
- Luminosité apparent d'une coquille d'épaisseur  $dr$  :  

$$\phi(r)dr = \frac{L\rho \times 4\pi r^2 dr}{4\pi r^2} = L\rho dr$$
- Luminosité totale de l'ensemble des coquille :

$$\phi = \int_0^{\infty} L\rho dr = +\infty$$

*Même avec une vitesse de la lumière finie ( $c = 300\,000 \text{ km s}^{-1}$ ), si  $\forall$  temps  $\exists$  des étoiles, le ciel nocturne devrait être infiniment éblouissant.*

**Le temps n'est pas homogène.**  $\exists$  un temps  $t_i$  avant lequel il n'y a pas de source lumineuse.

# Les équations de Friedmann

Les **équations de Friedmann** sont des équation qui **gouvernent l'évolution de l'espace temps** pour un Univers **homogène** et **isotrope** dans le contexte de la relativité générale.

## Equations de Friedmann

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G \rho}{3}$$

$$\frac{k}{a^2} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + 2\frac{\ddot{a}}{a} = -8\pi G P$$

**c = 1** : La vitesse de la lumière,

**k** : La courbure de l'univers : **k = 0** plat, **k < 0** sphérique, **k > 0** hyperbolique

**a** : Paramètre d'échelle de l'Univers,

**G** : La constante gravitationnelle,

**ρ** : Densité totale de la matière et du rayonnement, **ρ = ρ<sub>m</sub> + ρ<sub>γ</sub>** : varie avec le temps

**P** : La pression totale de la matière et du rayonnement, **P = P<sub>m</sub> + P<sub>γ</sub>** varie avec le temps

# Les équations de Friedmann

Les **équations de Friedmann** sont des équation qui **gouvernent l'évolution de l'espace temps** pour un Univers **homogène** et **isotrope** dans le contexte de la relativité générale.

## Equations de Friedmann

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G \rho_m}{3} + \frac{8\pi G \rho_\gamma}{3}$$

$$3 \frac{\dot{a}}{a} (P + \rho) + \dot{\rho} = 0$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -4\pi G (3P + \rho)$$

On pose alors  $H = \frac{\dot{a}}{a}$  la *constante* de Hubble.

L'équation précédente nous permet de définir les paramètres cosmologiques connus sous le nom de **paramètres de densité** :

### Densité de matière

$$\Omega_m = \frac{8\pi G \rho_m}{3H^2}$$

### Densité de courbure

$$\Omega_k = -\frac{k}{a^2 H^2}$$

### Densité de rayonnement

$$\Omega_\gamma = \frac{8\pi G \rho_\gamma}{3H^2}$$

# Les équations de Friedmann

## Equations de Friedmann

On peut alors simplifier ces equation :

$$1 = \Omega_m + \Omega_\gamma + \Omega_k$$

$$3H(P + \rho) + \dot{\rho} = 0$$

$$\dot{H} = -4\pi G(P + \rho) + \frac{k}{a^2}$$

Densité de matière

$$\Omega_m = \frac{8\pi G \rho_m}{3H^2}$$

Densité de courbure

$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{a^2H^2}$$

Densité de rayonnement

$$\Omega_\gamma = \frac{8\pi G \rho_\gamma}{3H^2}$$

# La constante de Hubble

- Contrairement à ce que son nom semble indiquer, la *constante* de Hubble n'est pas une *constante* :
  - ⇒ Elle est constante à l'échelle humaine, elle ne l'est certainement pas à l'échelle de l'Univers,
  - ⇒ On dénote par  $H_0$  sa valeur à l'époque actuelle.
- Elle joue de multiples rôles en cosmologie :
  - 1 donne l'échelle de temps de l'expansion qui permet d'estimer l'âge de l'Univers :

$$t_H = H_0^{-1} f(\Omega_m)$$

- 2 détermine la **densité critique** :

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

- 3 la distance de Hubble  $d_H = c H_0^{-1}$  donne l'échelle de l'horizon actuel et la relation entre la distance et le **redshift**  $z$  :

$$a_0 = c H_0^{-1} z$$

- 4 elle est nécessaire dans l'estimation des différents paramètres de densités.

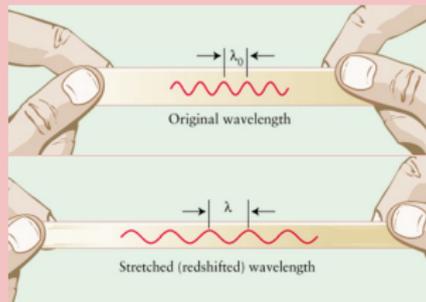
# La *constante* de Hubble : comment la mesure-t-on ?

La principale difficulté dans la mesure de  $H_0$  réside dans la complexité de mesurer les distances cosmologiques.

## Redshift

Avec l'expansion de l'Univers, la dilatation de l'espace temps induit un élargissement de la longueur d'onde des photons qui se traduit par un rougissement de la lumière.

$$1 + z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{H}{H_0}$$



Le redshift permet de mesurer les distances, mais, pour convertir le redshift en distance, il nous faut la valeur de  $H$

$$d = \frac{2c}{H_0} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}} \right)$$

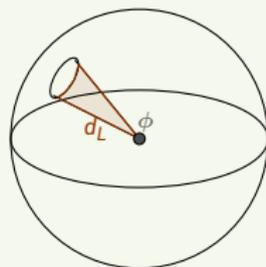
# La constante de Hubble : comment la mesure-t-on ?

La principale difficulté dans la mesure de  $H_0$  réside dans la complexité de mesurer les distances cosmologiques. Pour estimer  $H$ , ou  $H_0$ , il est nécessaire d'utiliser des méthodes indépendantes :

## Mesure de distance Lumineuse

Pour un objet de luminosité  $L$  connue, une mesure de la luminosité apparente (où flux)  $\phi$  permet de mesurer la **distance lumineuse** :

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi\phi}}$$



- De tels objets dont la luminosité intrinsèque est connue sont appelés des **chandelles standards**,
- Une source très lumineuse est nécessaire pour mesurer des distances **cosmologique**.

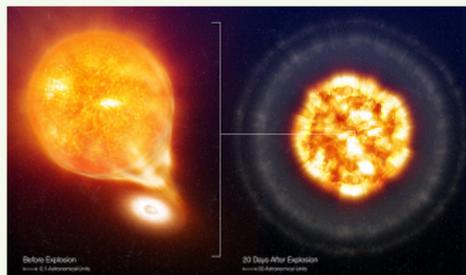
Seule les supernovae de type Ia sont suffisamment brillante pour nous permettre de mesurer des distances **cosmologique**

# La constante de Hubble : comment la mesure-t-on ?

La principale difficulté dans la mesure de  $H_0$  réside dans la complexité de mesurer les distances cosmologiques.

## Mesurer $H$ à partir de chandelles standard : Les supernovae Ia

Après avoir accreté de la matière au delà de la masse critique de Chandrasekhar, une naine blanche — un cadavre stellaire — implose sous forme de supernovae.



SN 2006X, before and after the Type Ia Supernova Explosion  
(Artist Impression)

ESO Press Photo 31b/07 (12 July 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



# La constante de Hubble : comment la mesure-t-on ?

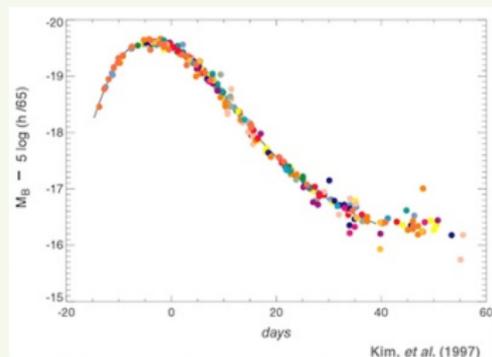
La principale difficulté dans la mesure de  $H_0$  réside dans la difficulté de mesurer les distances cosmologiques.

## Mesurer $H$ à partir de chandelles standard : Les supernovae Ia

Après avoir accreté de la matière au delà de la masse critique de Chandrasekhar, une naine blanche — un cadavre stellaire — implose sous forme de supernovae.

La composition des naines blanches est très semblable d'une étoile à l'autre, la courbe de lumière est donc très similaire d'une supernovae à l'autre. Ceci permet, en comparant les supernovae lointaine à des supernovae proche, de connaître leur distance.

Il est donc nécessaire de calibrer la courbe de lumière avec des Supernovae proche en mesurant les distance avec d'autres techniques.



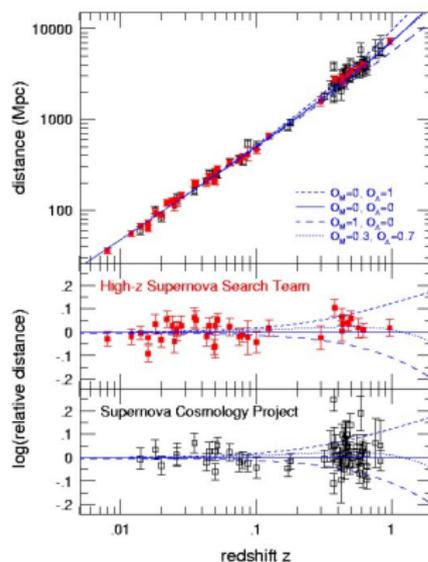
# La constante de Hubble : comment la mesure-t-on ?

La principale difficulté dans la mesure de  $H_0$  réside dans la difficulté de mesurer les distances cosmologiques. Mesurer  $H$ , à partir de chandelles standard :

## Les supernovae la

Les mesure de distances de supernovae menées par deux groupes, le *Cosmologie Supernovae Project* et *High-Z supernovae Search*, on mis en évidence expérimentalement la possibilité d'une accélération de l'Univers. Le diagramme de Hubble montre que des supernovae la à  $z \simeq 0.5$  sont 20 % moins lumineuse que ce qui est attendu pour un Univers ( $\Omega_M = 0.3; \Omega_\Lambda = 0$ ) :

- Ce-peut'il que la luminosité des supernovae soit différente dans le passé ?
- Ce-peut'il que 20 % de la luminosité des supernovae soit absorbée lors de sont voyage ?
- $\Omega_\Lambda > 0$

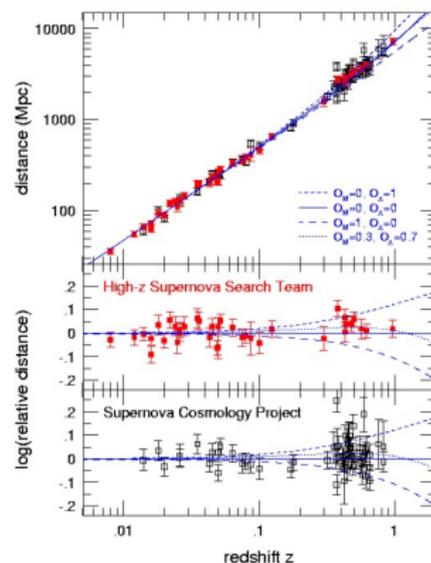


# La constante de Hubble : comment la mesure-t-on ?

La principale difficulté dans la mesure de  $H_0$  réside dans la difficulté de mesurer les distances cosmologiques.

Mesurer  $H$  a partir de chandelles standard : Les supernovae Ia

- Ce-peut-il que la luminosité des supernovae soit différente dans le passé ?  
*Envisageable. Il faut comparer la luminosité des supernovae dans différent type de Galaxie ayant des âges différent.*
- Ce-peut-il que 20 % de la luminosité des supernovae soit absorbée lors de sont voyage ?  
*Cette hypothèse suppose la présence de poussières totalement différentes des poussières trouvées dans la Voie lactée. Les poussière dans la Voie lactée est Galaxie voisine induisent un rougissement global du rayonnement.*
- $\Omega_\Lambda > 0$  Hypothèse la plus vraisemblable.



# La constante de Hubble : comment la mesure-t-on ?

La principale difficulté dans la mesure de  $H_0$  réside dans la difficulté de mesurer les distances cosmologiques.

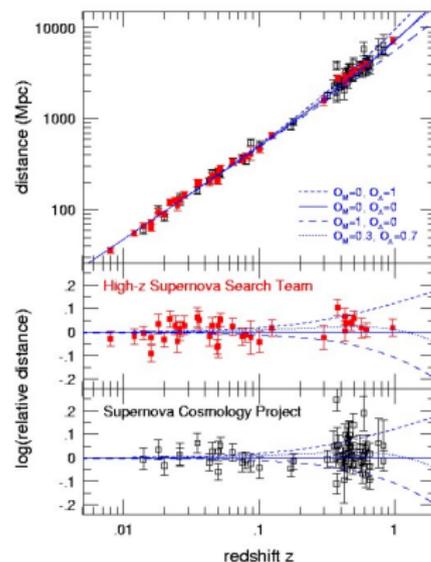
Mesurer  $H$  à partir de chandelles standard : Les limites des supernovae Ia

## Les limites expérimentales :

- Les supernovae Ia sont des événements rares : La détermination des paramètres cosmologiques est limitée par la statistique.
- L'étalonnage des chandelles standard limite également la précision des mesures de luminosité des supernovae Ia

## Amélioration possible :

- La réalisation de grand *survey* du ciel augmente les chances de détecter des supernovae et donc, d'augmenter la statistique.

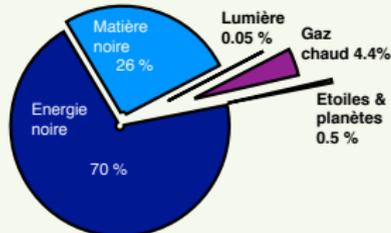


# Les équations de Friedmann

## Equations de Friedmann

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho_m + \rho_\gamma + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

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



La constante cosmologique contribue négativement à la pression, exhibant une nature répulsive !

### Densité de matière

$$\Omega_m = \frac{8\pi G \rho_m}{3H^2}$$

### Densité d'énergie

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$$

### Densité de rayonnement

$$\Omega_\gamma = \frac{8\pi G \rho_\gamma}{3H^2}$$

### Densité de courbure

$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{a^2H^2}$$

# $\Omega_\Lambda$ : constante cosmologique ?

- Initialement introduite par Einstein en 1917 pour obtenir un Univers statique à partir des équation de Friedmann,
- Abandonnée par Einstein en 1929, après la découverte de l'expansion de l'Univers par Hubble,

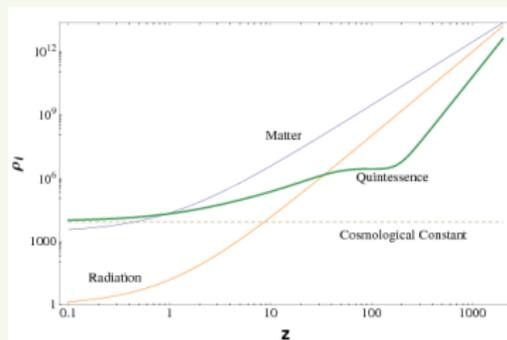
## Candidat à l'énergie noire : La constante cosmologique

- Émerge naturellement de la physique des particules sous la forme de l'énergie du vide, ou énergie du point zéro :
  - Le vide est envisagé comme un milieu avec lequel il est possible d'échanger de l'énergie. Cet échange modifie son état d'énergie.
- Assimilable à un fluide qui remplit l'espace  $\Rightarrow$  la constante cosmologique est invariante dans l'espace et le temps avec une équation d'état  $\omega_\Lambda = P_\Lambda / \rho_\Lambda - 1$  :
  - L'accélération de l'expansion de l'Univers implique  $\rho_\Lambda < 10^{-9} \text{ J m}^{-3}$
  - L'électrodynamique quantique impliquerait  $\rho_\Lambda \simeq 10^{113} \text{ J m}^{-3}$  pour être cohérente avec le principe d'invariance de Lorentz.

# $\Omega_\Lambda$ : constante cosmologique ?

## Candidat à l'énergie noire : La quintessence

- Champ scalaire dynamique emplissant l'Univers,
  - L'équation d'état  $\omega_Q = P_Q/\rho_Q$  varie dans le temps,
- La densité d'énergie du champ de quintessence suit l'évolution de la densité d'énergie jusqu'au moment où la densité d'énergie du rayonnement et de la matière sont égales,
- A partir de ce moment, la quintessence exhibe un comportement répulsif qui, éventuellement, finira par dominer l'Univers.



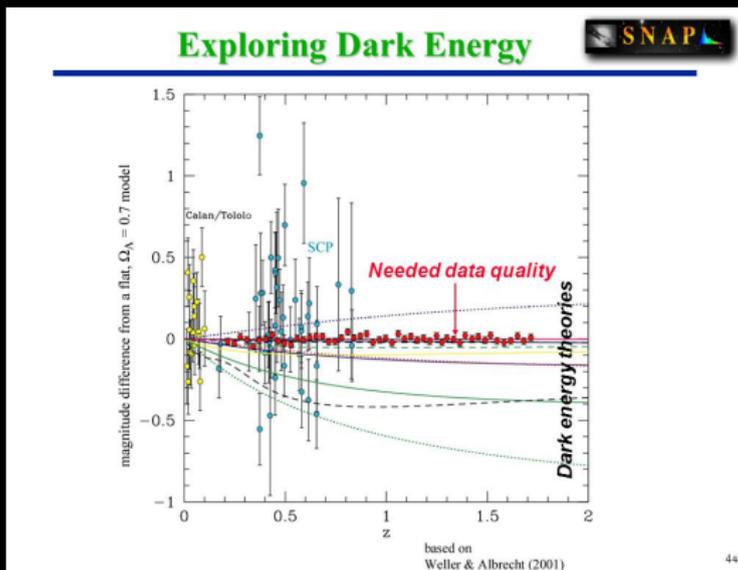
## Candidat à l'énergie noire : Modification de la gravité

Et s'il n'y avait pas d'énergie noire ? La Modification de la gravité est une alternative à l'énergie noire : Plusieurs modèles ont été développés. Chaque modèle doit cependant vérifier une série de tests pour être accepté :

# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

Les différentes théories de l'énergie noire prédisent de petites différences dans l'évolution temporelle de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Il est donc important de mesurer la dépendance temporelle de l'accélération de l'expansion de l'Univers. L'identification de l'énergie noire nécessite donc de mesurer de façon encore plus précise l'expansion de l'Univers :

- Les mesures actuelle des supernovae ne permettent pas d'obtenir cette dépendance temporelle,



# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

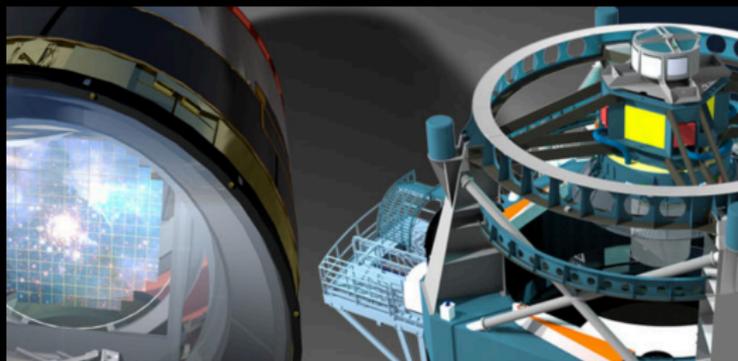
Les différentes théories de l'énergie noire prédisent de petites différences dans l'évolution temporelle de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Il est donc important de mesurer la dépendance temporelle de l'accélération de l'expansion de l'Univers. L'identification de l'énergie noire nécessite donc de mesurer de façon encore plus précise l'expansion de l'Univers :

- Les mesures actuelles des supernovae ne permettent pas d'obtenir cette dépendance temporelle,
  - 1 Plus d'étalons : beaucoup plus de SNIa avec des mesure plus précise
  - 2 Augmenter le bras de levier : Observation de SNIa à plus haut redshift, plus d'historique
  - 3 Augmenter la précision : utiliser d'autre sonde cosmologique

# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

- 1 Plus d'étalons : beaucoup plus de SNIa avec des mesure plus précise

Le télescope Hubble n'a scanner que  $4 \times 10^{-5}\%$  du ciel observable  $\Rightarrow$  ça revient à étudier la complexité de la population française en ayant rencontré que 2 individu ...  
 $\Rightarrow$  Pour mesurer plus de SNIa, il faut surveiller l'intégralité du ciel observable :



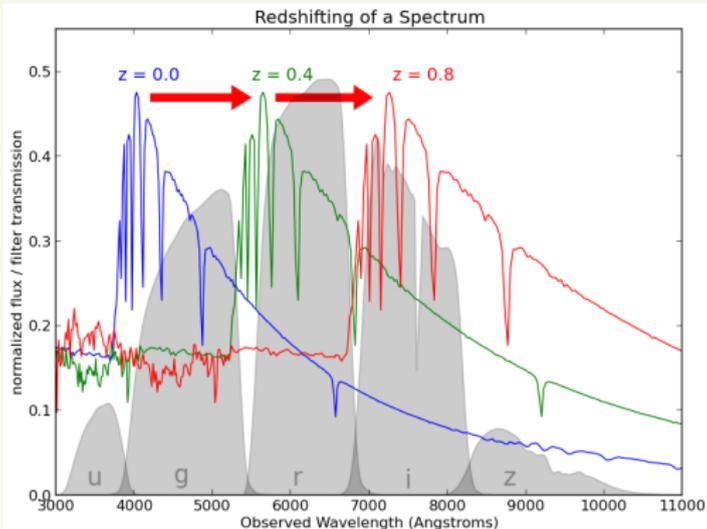
## LSST

### The Large Synoptique Survey Telescope

- 10 million de galaxie attendues
- 1 image = 40x la taille apparente de la Lune  $\Rightarrow$  cartographie du ciel observable en quelques nuits
- Mesure de distance photométrique sur 6 filtres

$\Omega_\Lambda$  : contraindre l'énergie noire

## Redshift photometric



# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

- 1 Plus d'étalons : beaucoup plus de SNIa avec des mesure plus précise
- 2 Augmenter le bras de levier : Observation de SNIa à plus haut redshift, plus d'historique
  - ⇒ Pour aller plus loin en redshift → aller dans 'infrarouge
  - ⇒ il faut aller dans l'espace,
  - ⇒ Pour une historique précise, il faut une grande précision sur la mesure du redshift
  - ⇒ Mesure du redshift spectroscopique



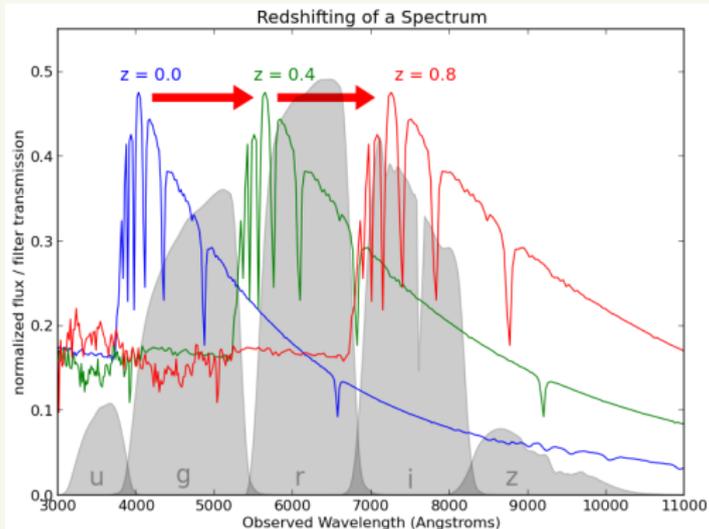
## WFIRST

### The Wide Field Infrared Survey Telescope

- 1 million de galaxie attendues
- 2 WFIRST image = 432 image HST
- Mesure de distance photométrique et spectrométrique

$\Omega_\Lambda$  : contraindre l'énergie noire

## Redshift spectroscopique



# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

## Redshift spectroscopique



SDSS fiber plate

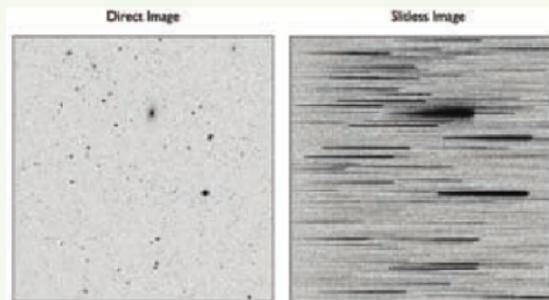
En générale, pour obtenir un redshift spectroscopique pour une source il faut une fente, pour plusieurs source :

- Une exposition photo pour repérer les sources d'intérêt,
- Une plaque métallique percée avec plusieurs trous → une pour chaque source → une plaque par région du ciel observable,
- Des fibres optiques pour amener la lumière vers la fente.

pas très pratique pour un telescope spatial.

# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

## Redshift spectroscopique : Spectroscopie sans fente



*Spectroscopie sans fente*

Pour y remédier, on effectue une spectroscopie sans fente :

- Beaucoup de chevauchement de spectre
- Nécessite un traitement de décontamination pour atteindre la précision nécessaire.

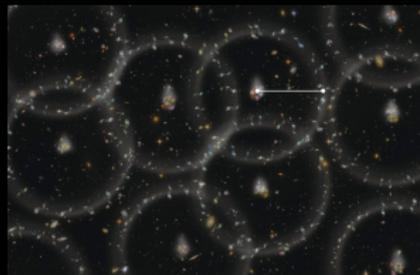
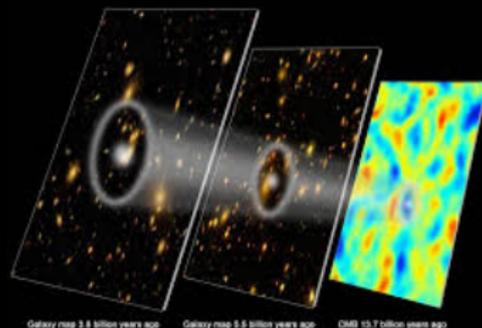
# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

Les différentes théories de l'énergie noire prédisent de petites différences dans l'évolution temporelle de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Il est donc important de mesurer la dépendance temporelle de l'accélération de l'expansion de l'Univers. L'identification de l'énergie noire nécessite donc de mesurer de façon encore plus précise l'expansion de l'Univers :

- Les mesures actuelles des supernovae ne permettent pas d'obtenir cette dépendance temporelle,
  - 1 Plus d'étalons : beaucoup plus de SNIa avec des mesure plus précise
  - 2 Augmenter le bras de levier : Observation de SNIa à plus haut redshift, plus d'historique
  - 3 Augmenter la précision : utiliser d'autre sonde cosmologique

# Les Oscillations Acoustiques des Baryons (BAO)

- Les régions de sur-densités du plasma primordial contiennent la matière noire, des baryons et des photons,
  - L'attraction gravitationnelle et la pression de radiation sont en compétition  $\Rightarrow$  des ondes acoustiques se propagent entraînant avec elles le plasma de baryons et de photons,
  - Au moment du découplage, les photons voyagent librement et les ondes acoustique, qui ne sont plus soumises à la pression de radiation, se figent formant une coquille sphérique entourant la région de sur-densité à l'origine des ondes acoustique. Le rayon de cette sphère est appelé **l'horizon sonore**.
- $\Rightarrow$  Le centre des sur-densité, peuplé par la matière noire, continue d'attirer les baryons pour former des galaxies,
- $\Rightarrow$  Les sur-densités de baryons dans la coquille attire la matière pour éventuellement former des structures.



Mesurer avec précision la distribution des galaxies pour en extraire la forme des ondes acoustiques et la taille de l'horizon sonore apporte de nouvelles perspectives pour l'identification de l'énergie noire et la mesure des paramètres de densité.

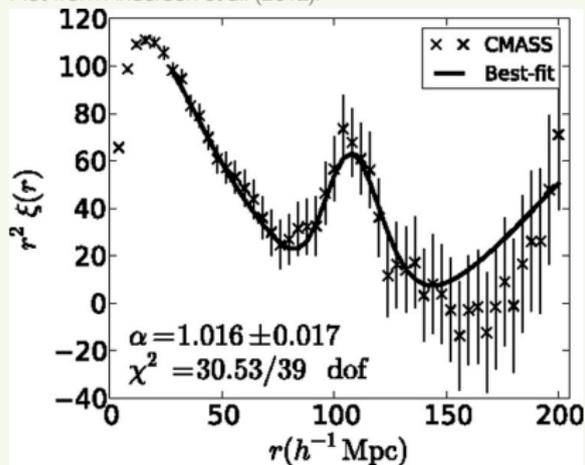
# Les Oscillations Acoustiques des Baryons (BAO)

## Mesurer le pic BAO

Pour mesurer le pic BAO, on calcule la fonction de corrélation à deux points qui décrit la probabilité que deux galaxies soit séparé par une distance particulière. Cette fonction de corrélation se rapporte au spectre de puissance de la distribution de matière dans l'Univers :

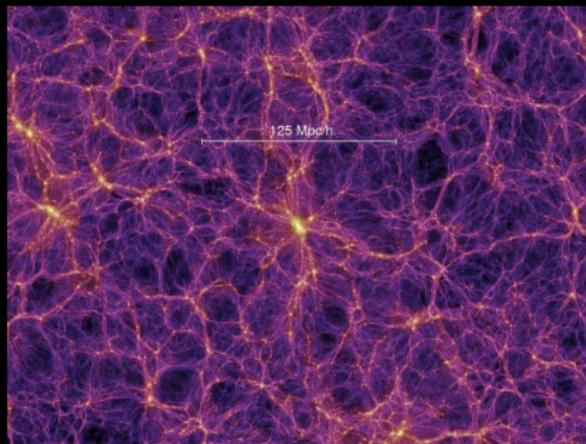
- La position du pic BAO dépend du taux d'expansion de l'Univers,
- La position du pic BAO dépend du taux d'expansion de l'Univers,
- La pente de la fonction de corrélation dépend de la masse des neutrinos,

Plot from Anderson et al. (2012).



BOSS DR9 correlation function for the CMASS galaxy sample.

# Les vides cosmique



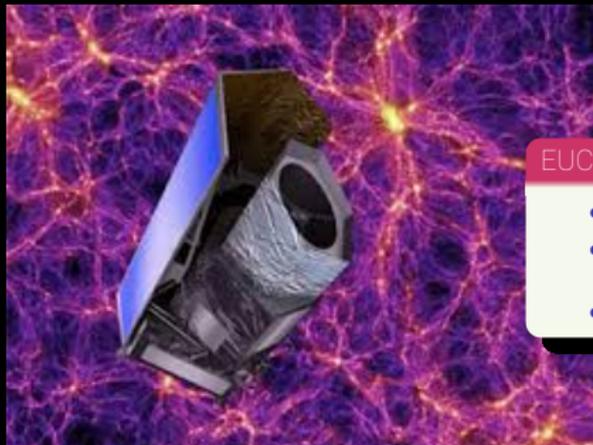
Les vides cosmiques sont des régions entre les filament cosmique, *vide* de matière :

- En absence de matière, les effet de la gravitation y sont plus faible  $\Rightarrow$  l'énergie noire y est dominante,
- La forme des vides cosmiques dépend de l'historique de l'expansion de l'Univers et de son contenu en matière.

# $\Omega_\Lambda$ : contraindre l'énergie noire

Pour une bonne précision il nous faut

- 1 Une mesure précise du redshift de galaxies,
- 2 Beaucoup de galaxies, répartie sur l'ensemble du ciel



## EUCLID

- 10 millions de galaxies attendues
- Mesure de distance photométrique et spectrométrique
- Spectromètre sans fente

## Le future

## Dark Energy Experiments: 2013 - 2031

