# De la constante cosmologique à l'énergie noire

Francis Bernardeau, IPhT Saclay

# 1. La constante cosmologique, perspective historique

La proposition d'Einstein

#### Equations d'Einstein

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G_{\mathrm{N}}}{3} \left(\rho + 3P\right) a + \frac{\Lambda a}{3}$$

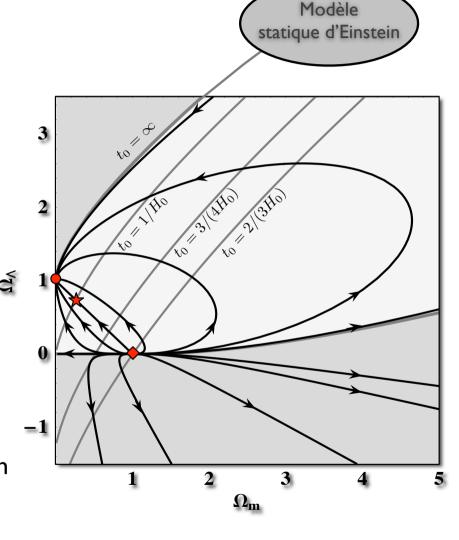
$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \rho a^2 + \frac{\Lambda a^2}{3} - K$$

La solution d'Einstein : un univers fini (pour satisfaire au principe de Mach) et statique

$$\Lambda = \frac{1}{a_{\rm E}^2}$$

Lemaître = cette solution est instable (1927); génériquement on s'attend à un univers en expansion (1922)

De Sitter = une solution sans matière (1924)



### 1930 = l'univers est en expansion

On a plus besoin de la constante cosmologique

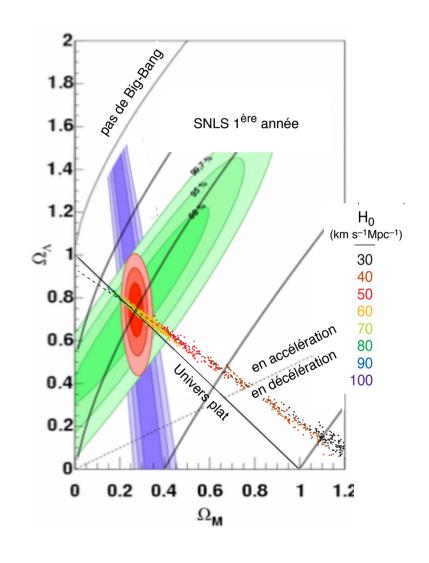
Mais très vite on est confronté au problème de l'âge de l'univers versus valeur de  $H_0$ : solution en réintroduisant la constante cosmologique qui permet de vieillir autant qu'on veut l'univers

années 90 = [détermination de H<sub>0</sub> (HST) + confirmation de l'âge des étoiles (Hipparcos) + forme du spectre des fluctuations de densité] confirment tension et conduisent à la formulation du modèle concordant (1995)

La communauté bascule avec résultats du SCP et HzSST

#### 1999 = Le modèle concordant

- Ingrédients =
   GR + principe cosmologique sont valables (Eqs de Friedmann, redshifts, distances, développement des instabilités gravitationnelles)
- Matière noire (80% de la matière)
- Energie noire (= constante cosmologique pour 70% de l'énergie)
- ▶ Fluctuations de métrique adiabatiques ayant un spectre primordial (quasi) invariant d'échelle



### Constante cosmologique, énergie noire

- une deuxième constante dans la théorie de la gravitation et une constante dimensionnée (différemment de G).
- Cosmologie = problème de la coïncidence
- Equivalent à un fluide d'équation d'état P=-rho (et la constante cosmologique devient énergie noire), c'est à dire un fluide quelque peu exotique ! On verra au cours de cette semaine qu'effectivement ce n'est pas si facile de construire un modèle cohérent d'"énergie noire"
- une propriété du vide

## Equations d'Einstein, points de vue

1. La constante cosmologique est géométrique

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}^{\text{matière}}$$

2. Le vide contribue au tenseur énergie impulsion

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G \left( T_{\mu\nu}^{\text{matière}} + T_{\mu\nu}^{\text{vide}} \right)$$
$$T_{\mu\nu}^{\text{vide}} = \rho_{\text{vide}} g_{\mu\nu} = \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu}$$

3. La gravité toute entière est une propriété du vide ; c'est une propriété induite, due à l'élasticité du vide (Sakharov, 1968)

$$0 = 8\pi G \left( T_{\mu\nu}^{\text{matière}} + T_{\mu\nu}^{\text{vide}} + T_{\mu\nu}^{\text{RG}} \right)$$
$$T_{\mu\nu}^{\text{RG}} = \frac{-1}{8\pi G} G_{\mu\nu}$$

# Du vide cosmologique au vide quantique

- La relativité générale est sensible au niveau absolu des densités d'énergie
- Point de vue totalement orthogonal à la mécanique quantique où on s'empresse de cacher les infinis en arguant qu'ils ne correspondent pas à des observables

#### Pauli, 1920:

A partir des degrés de liberté du champ de radiation traité comme oscillateur harmonique, l'énergie du vide n'est finie que si

$$\langle \rho \rangle_{\text{vide}} = 2 \int_0^{\omega_{\text{max}}} \frac{1}{2} \omega \frac{4\pi \omega^2 d\omega}{(2\pi)^3} = \frac{\omega_{\text{max}}^4}{8\pi^2}$$

Si on prend le rayon classique de l'électron comme cut-off pour les petites longueur d'onde  $2\pi$   $2\pi m$ 

 $\omega_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda_{\max}} = \frac{2\pi m_e}{\alpha}$ 

alors on trouve une constante cosmologique qui donne un rayon d'Einstein de 31 km

## Le vide quantique

Pauli avait raison de s'inquiéter : on est toujours confronter au même problème ! Si on tente de calculer l'énergie du vide avec les degrés de liberté des champs connus, on a

$$\langle \rho \rangle_{\rm vac}^{\rm Planck} \sim (10^{18} \, {\rm GeV})^4$$

ou

$$\langle \rho \rangle_{\rm vac}^{\rm EW} \sim (200 \, {\rm GeV})^4$$

selon que le cut-off est à l'échelle de Planck, ou à l'échelle électrofaible

▶ Ca veut dire que la constante cosmologique mesurée serait

$$\Lambda_{\rm mes.} = \Lambda_{\rm E} + \Lambda_{\rm Q}.$$

et serait donc 10<sup>-60</sup> fois plus petite qu'une de ses contributions

▶ Gravité et mécanique quantique = le mariage impossible

$$G^{-2} \hbar^2 c^{-6} = 2.2 \ 10^{76} \ \text{Gev}^4$$

$$\Lambda^2 \ \hbar^4 c^{12} = 4. \ 10^{-167} \ \text{Gev}^4$$

$$\rho_{\text{vide}} \hbar^3 c^3 = 4. \ 10^{-47} \ \text{Gev}^4$$

# Constante cosmologique ou Energie noire ?

- ▶ une constante de la nature, au même titre que G
- ▶ une propriété du vide (quantique)
- ▶ une densité d'énergie, résidu accidentel d'un processus compliqué (e.g. argument anthropique, Weinberg, 1987)
- ▶ une composante dynamique lié au secteur "noir"
- un artefact

# 2. Modèles d'énergie noire, faisons le tri

#### l'action de la Relativité Générale

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R + S_m[\text{mat}; g_{\mu,\nu}]$$

#### Dérive de

- interaction via un champ sans masse de spin 2
- matière couplée minimalement à la métrique qui assure la vérification du principe d'équivalence

#### Modèles de classe A:

On ajoute un terme d'énergie noire à l'action

$$S_{\mathrm{de}}[\mathrm{de};g_{\mu,\nu}]$$

- pure constante cosmologique ;
- champ de quintessence
- matière noire "solide" (e.g. réseau frustré de défauts topologiques)
- Gaz de Chaplygin
- K-essence

On préserve le principe d'équivalence, le Principe Cosmologique

#### Modèles de classe B :

On ajoute un terme d'énergie noire à l'action + modification de l'action dans le secteur de la matière

$$S_{\varphi}[\varphi; g_{\mu,\nu}]$$

$$S_{m}[\operatorname{mat}; g_{\mu,\nu}] \longrightarrow S_{m}[\operatorname{mat}_{i}; A_{i}(\varphi) g_{\mu,\nu}]$$

- théories tenseur-scalaire
- modèle de Caméléon
- **...**

On brise ici le principe d'équivalence + variations possibles de constantes fondamentales.

#### Modèles de classe C :

Modification plus drastique de l'action... lci l'action qu'on écrit (si on peut) est en fait une action effective dérivant d'une théorie beaucoup plus complexe.

- modèles avec dimensions supplémentaires
- multi-gravité
- gravité induite sur le branes

#### Modèles hors-classe (artefacts):

- Qui remettent en cause l'interprétation des données telle qu'on la fait habituellement
- ▶ possibilité d'une interaction photons-axions (oscillations dans un champ magnétique extérieur). Dans ce cas le manque de luminosité des SNs serait due à une disparition des photons en cours de route. Cela implique en particulier que

$$D_L(z) \neq (1+z)^2 D_A(z)$$

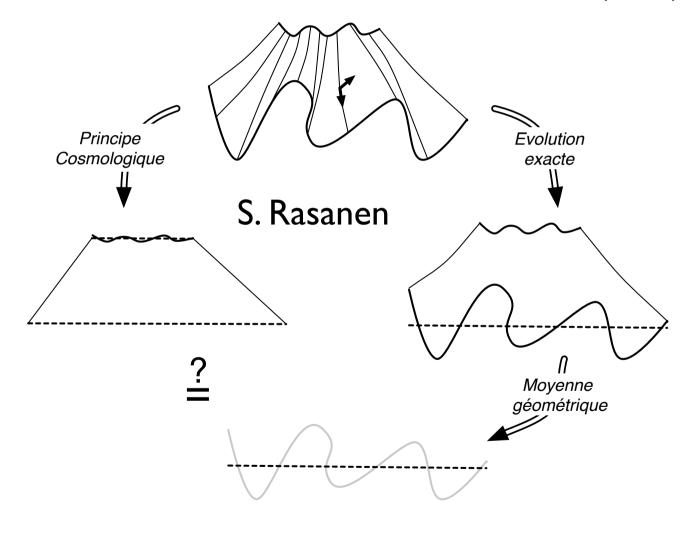
- ▶ Brisure du principe Corpernicien (e.g. l'univers est statistiquement isotrope mais pas homogène)
- La RG est parfaitement valable mais on ne sait pas faire de calculs avec, notamment en présence de fluctuations de métrique aux petites échelles, e.g. on n'a le droit d'écrire les équations de Friedmann appliqué pour un univers même faiblement inhomogène.

**...** 

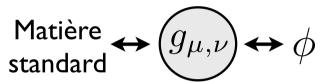
#### Contre-effets (backreaction) de la dynamique

Origine du problème :

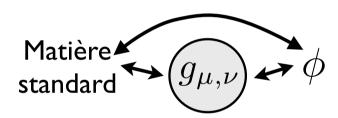
Buchert, arXiv:0707.2153 S. Rasanen, après la pause



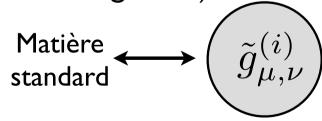
#### Classe A (quintessence type)



Classe B (tenseur-scalaire)



Classe C (modification de la gravité)



#### Les observables

#### Evolution du background

Distances lumineuses (SNs) et angulaire (amas)

$$d_A = \int_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{H(z')}$$

dz/dt (par des mesures spectro auprès des ELTs), une des rares mesures possibles qui ne soit pas sur le cône de lumière

$$rac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=(1+z)H_0-H(z)-rac{1}{\sqrt{3}}\sigma(z)$$
 amplitude du shear (Uzan et al. '08)

#### Evolution des perturbations

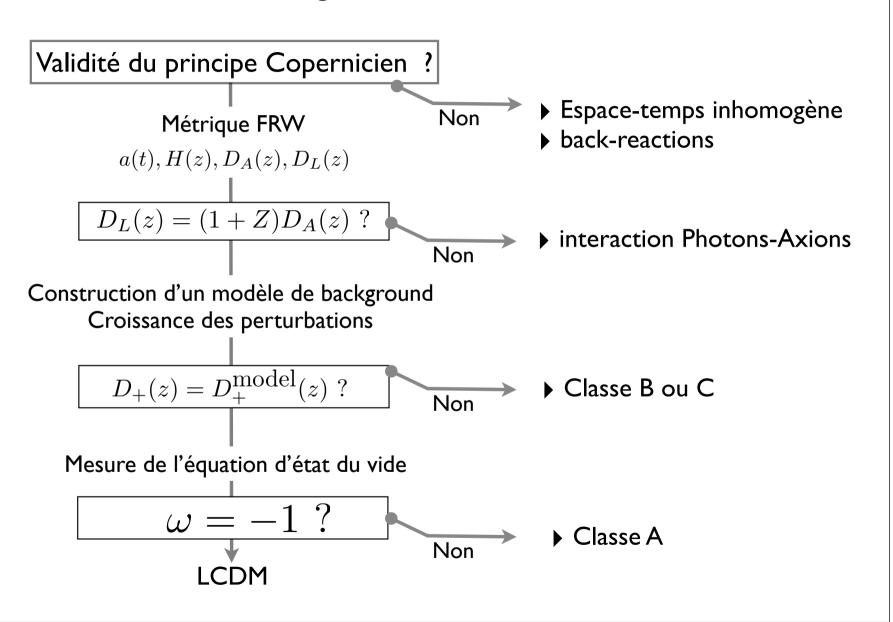
Equation maîtresse

Pas de terme de source si modèle A, et on a (on supposant GR, classe A ou B)

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}D_+ + 2H(t)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}D_+(t) - \frac{1}{a^2}\Delta\Phi = \mathcal{S}_{\mathrm{de}}$$
$$\Delta(\Phi - \Psi) = 8\pi G a^2\Pi_{\mathrm{de}}$$
$$\Delta\Phi = 8\pi G a^2(\rho_{\mathrm{m}}\delta_{\mathrm{m}} + \rho_{\mathrm{de}}\delta_{\mathrm{de}})$$

Mesures concernent  $\phi$  (champ de vitesse) et  $\phi+\psi$  (lentilles gravitationnelles)

#### Un algorithme de détection



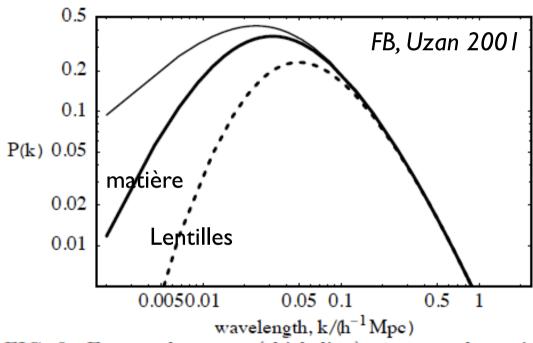
# 3. Les grandes structures de l'univers comme laboratoire de la gravité

# Les grandes structures

- grands relevés galaxies
- grands relevés weak lensing
- La théorie linéaire est bien "testée" avec les anisotropies du CMB
- Peu de test précis dans l'univers local
  - relation densité-vitesse (cosmographie)
  - à travers les relevés de galaxies
- Application de la théorie des perturbations...

# Tester la gravité, 1

Modification du taux de croissance des structures à grande échelle

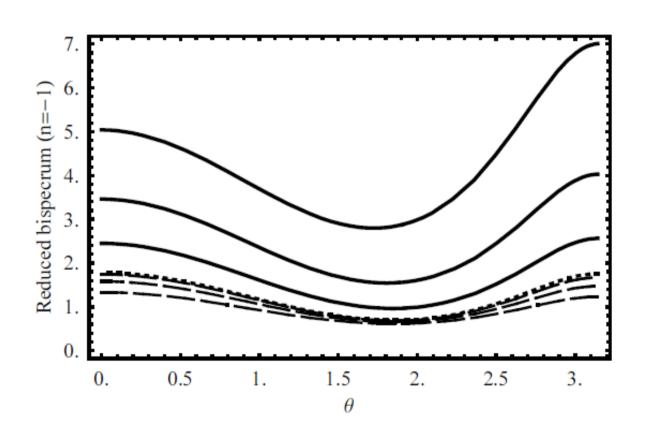


OK si énergie noire ne contribue pas aux fluctuations.

FIG. 3. Expected matter (thick line) power and gravitational potential Laplacian (dashed line) power spectra as functions of k compared to the standard cosmology case (thin line). We have assumed a CDM like scenario (with  $\Gamma = 0.25$ ) and  $r_s = 50 \, h^{-1} \, \mathrm{Mpc}$ .

# Tester la gravité, 2

Il existe cependant des relations de consistance, par exemple au niveau du bispectre...



Potentiel gravitationnels

Gravité normale

Champ de densité