

Cosmologie observationnelle : quelques perspectives

O. Perdereau



Laboratoire de l'Accérateur Linéaire
IN2P3-CNRS et Université de Paris-Sud 11

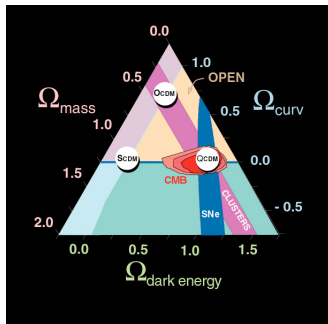
Produced with PDF \LaTeX (style beamer) within GNU-Linux

06/2006 - Branville

- 1 Panorama général (OP)
 - ▶ La cosmologie (brève introduction)
 - ▶ “ponts” vers la physique des particules...
- 2 CMB post-Planck (Cyrille)
- 3 Surveys optiques et radio (Réza)
- 4 (débat)

Questions :

- Quelle est l'âge (la taille) de l'univers ?
- D'où vient-il ?
Quel est son futur ?
- De quoi est-il fait ?
- et sa partie sombre ?
- ...



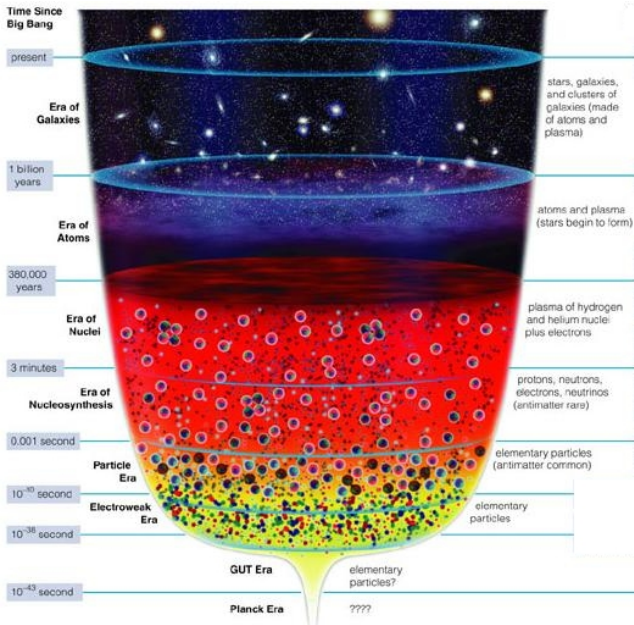
Réponses cherchées avec un *modèle de concordance*

→ **modèle du “Big-Bang”**

Formalisme sous-jacent : Relativité Générale

~ 10 “paramètres cosmologiques” estimés par des méthodes et techniques

complémentaires



- (5) formation des structures (galaxies, étoiles, ...) par la gravitation
- (4) "Libération" des photons = **découplage** (à 300000 ans) → **émission du CMB**
- (3) Nucléosynthèse (de 3 à 30 mn) (→ éléments légers)
- (2) expansion "lente" : apparition de quarks, leptons (electrons) puis nucléons (p,n)
- (1) inflation
- (0) état initial (??)

① Relativité générale :

- ▶ description géométrique de l'univers (“métrique”)
- ▶ et son équation d'évolution (dite “d'Einstein”)

② comportement des composants (“équation d'état”)

- ▶ Thermodynamique
- ▶ Mécanique quantique
- ▶ Physique Nucléaire et des Particules

L'équation fondamentale de la RG

(ou équation d'Einstein)

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

tenseur d'Einstein
fonction de la géométrie (métrique) :

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

impulsion-énergie

constante cosmologique

L'équation de Friedman

Dans le cas d'un univers homogène et isotrope (et avec la métrique FLRW) :

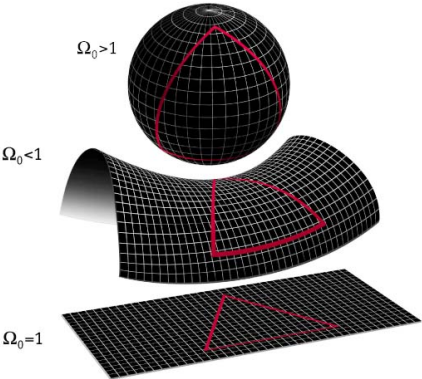
$$H^2(t) + \frac{kc^2}{R_0^2} \frac{1}{a^2(t)} = \frac{8\pi G\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}$$

En posant :

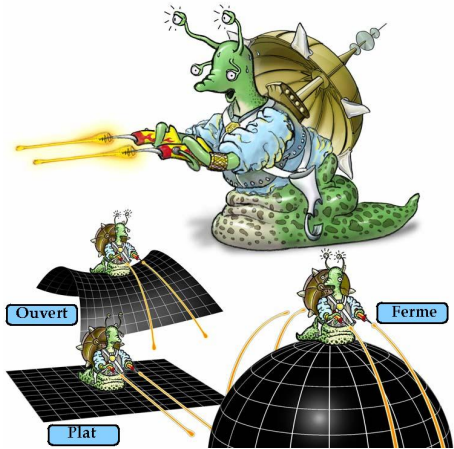
$$\Omega_m(t) = \frac{8\pi G\rho(t)}{3H^2(t)} ; \quad \Omega_\Lambda(t) = \frac{\Lambda}{3H^2(t)} ; \quad \Omega_{curv}(t) = \frac{-kc^2}{R_0^2 H^2(t) a^2(t)}$$

$$\underbrace{\Omega_{mass}(t) + \Omega_\Lambda(t)}_{\Omega_0} + \Omega_{curv}(t) = 1$$

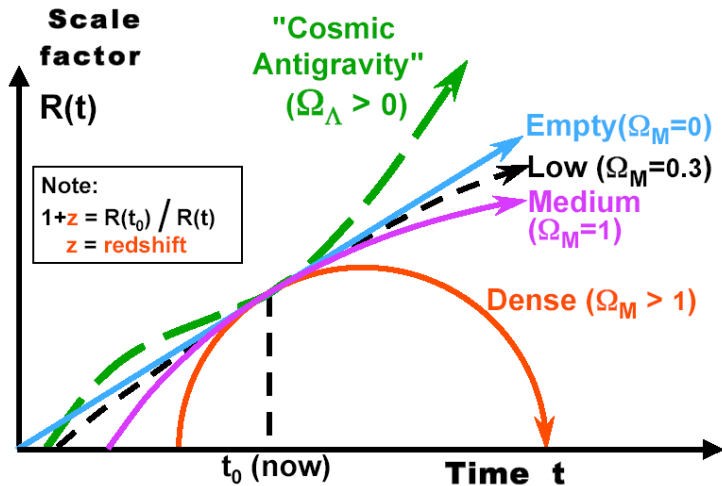
Géométrie(s) de l'univers



MAP990006



Facteur d'échelle



Cosmologie "classique"

Si on mesure H_0 , Ω_m , $\Omega_\Lambda \Rightarrow$ géométrie (courbure) et dynamique de l'univers "déterminés"

\rightarrow tests cosmologiques "classiques" :

- **luminosité apparente de "chandelles standard"** :

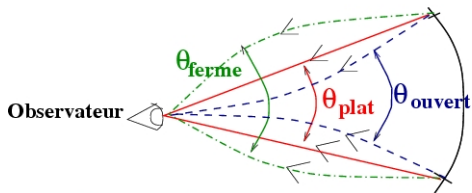
luminosité absolue (intrinsèque) \mathcal{L} connue \Rightarrow flux apparent $\Phi \propto 1/R^2$

$$\text{Distance de luminosité } d_L^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi\Phi}$$

- **taille apparente de "règles standard"** \rightarrow distance angulaire $d_A \sim \frac{\ell}{\theta}$
- comptage de galaxies
- ...

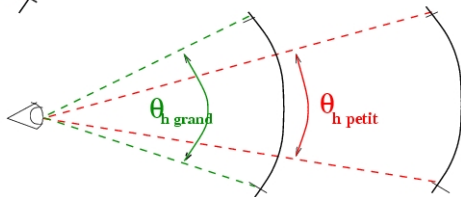
Age, taille de l'univers \Rightarrow checks de consistance

Geometrie de l'Univers et taille angulaire



$$\theta_{\text{ferme}} > \theta_{\text{plat}} > \theta_{\text{ouvert}}$$

Effet de l'expansion



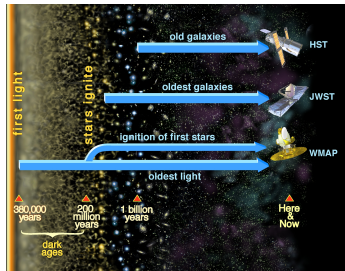
D'après C. Lineweaver

Quelques paramètres et approches

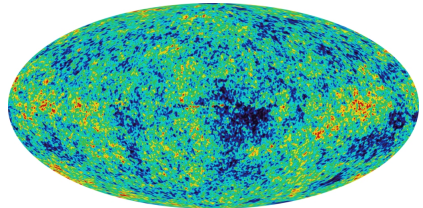
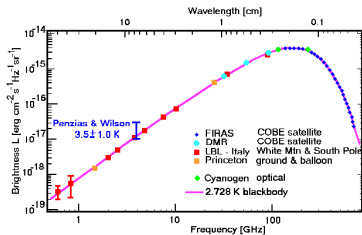
Approche	H_0	Ω_M	Ω_Λ (w, w')	Ω_0	Ω_B	LSS (σ_8)	n_s (an. prim.)
SN (proches)	✓						
SN (lointaines)		✓	✓ (✓)				
WL		✓				✓	
$N(z)/P_k$		✓	✓ (✓)	✓		✓	
CMB	✓	✓	✓ (-)	✓	✓		✓

NB : dégénérescences \Rightarrow *croisement(s) des approches*

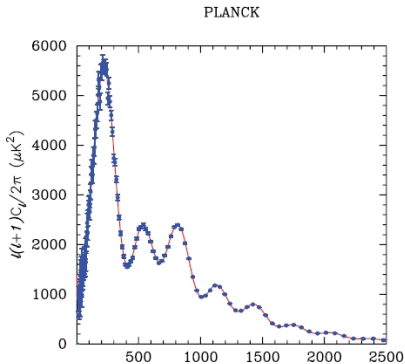
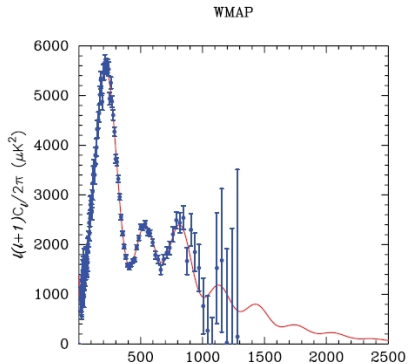
Le CMB



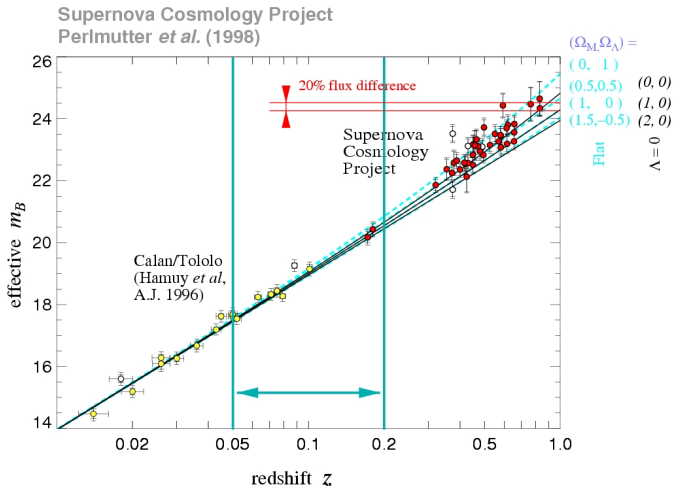
un corps noir presque parfait, avec de petites anisotropies **fondamentales**



Planck vs WMAP



Relation magnitude – redshift

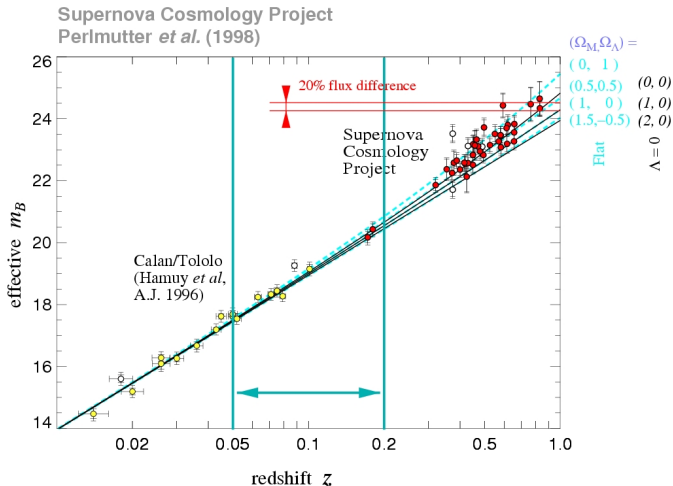


$$m \sim M - 5 \log_{10}(H_0) + 5 \log_{10}(cz) + 1.086 (1 - q_0 z + O(z^2))$$

lois $1/R^2$ et de Hubble

$$q_0 = \Omega_0/2 - \Omega_\Lambda$$

Relation magnitude – redshift

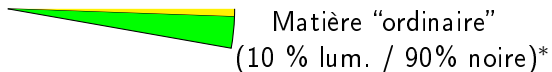


$$m \sim M - 5 \log_{10}(H_0) + 5 \log_{10}(cz) + 1.086 (1 - q_0 z + O(z^2))$$

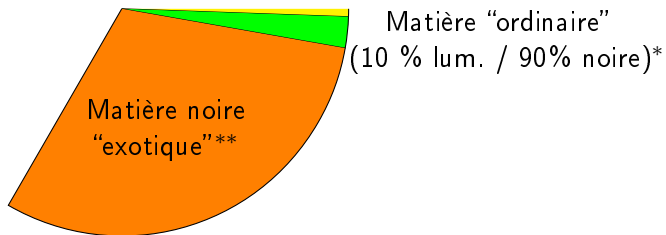
lois $1/R^2$ et de Hubble

$$q_0 = \Omega_0/2 - \Omega_\Lambda$$

Composition de l'univers

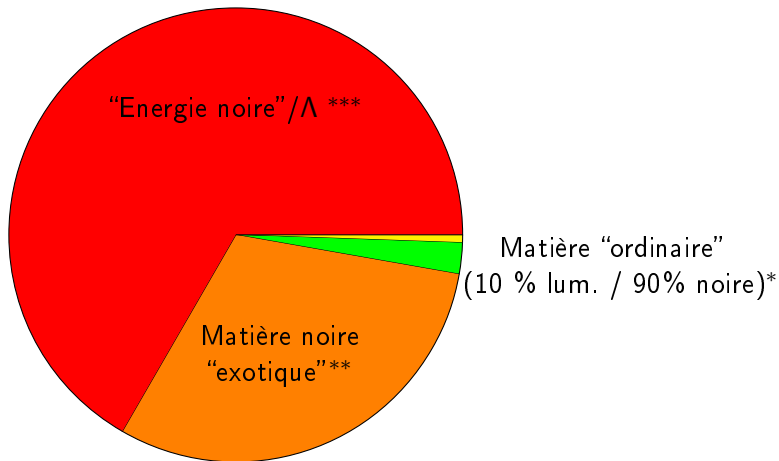


Composition de l'univers



** nature inconnue

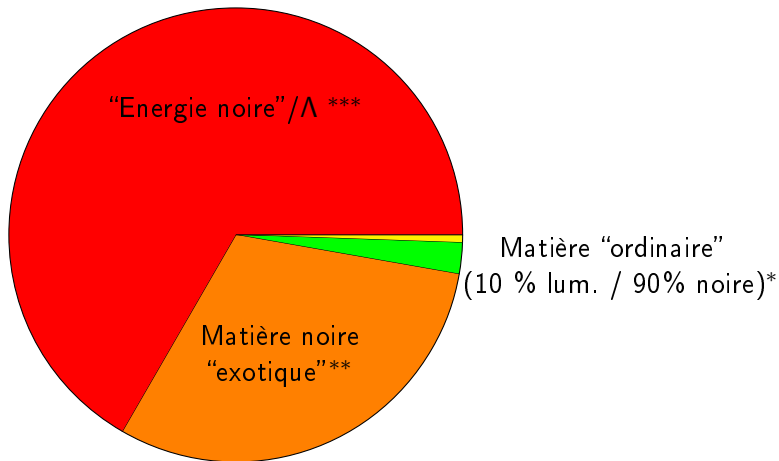
Composition de l'univers



** nature inconnue

*** encore plus mystérieuse

Composition de l'univers



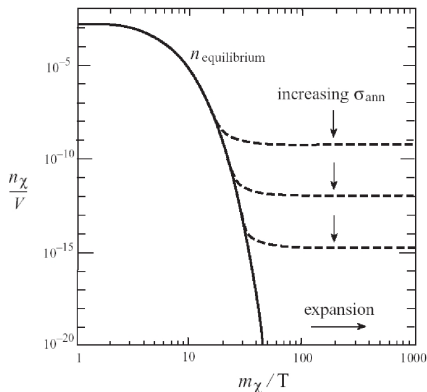
* et l'antimatière?

** nature inconnue

*** encore plus mystérieuse

Matière Noire ?

- extensions au MS \rightarrow nouvelles particules \sim TeV + nouvelle symétrie \rightarrow une au moins est stable
- univers primordial : équilibre thermique
$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \sigma_{ann} \cdot (n^2 - n_{eq}^2)$$
- lors de l'expansion : $T \searrow \Rightarrow$ libre parcours moyen \nearrow
- quand libre parcours moyen \geq taille de l'univers \Rightarrow "gel" : abondance figée
- pour M_{EW}, σ_{EW} : $\Omega_\chi = .01 - 1!$



- **Masse des neutrinos** :
 - ▶ neutrinos produits ds l'univers primordial
 - ▶ composante de la densité totale d'énergie (cf BBN)
 - ▶ neutrinos légers → relativistes
 - ▶ **signatures dans la formation des structures**
- **Matière/antimatière** : Absence d'antimatière possible si C, CP, B voiles + hors d'équilibre (Sakharov 1960)
Conditions remplies pour le MS à la transition de phase EW ?
Mais
 - ▶ taux de violation de CP trop faible
 - ▶ transition de phase *continue* (2de espèce)... chercher au delà du MS ?
- **Λ /énergie noire**
 - ▶ largement inconnue
 - ▶ lien avec la polarisation du vide ?
 - ▶ calcul naïf avec SUSY → symétries $\sim 10^{60}$ fois trop ...
- **inflation** : fait intervenir un (des ?) champ scalaire ...

- Le modèle du Big-Bang est maintenant bien établi
- La cosmologie observationnelle qualitative → quantitative
- “foisonnement” d’approches
- avec \sim *Planck* → mesure “de précision”
- complémentarité avec HEP en particulier sur questions pendantes :
 - ▶ nature de la matière noire
 - ▶ masse des ν
 - ▶ asymétrie matière/antimatière
 - ▶ nature de l’énergie noire