

Une cosmologie dominée par le vide

ou plutôt par l'énergie noire

Jean Kaplan

PCC Collège de France

Plan

- Constante Cosmologique/Énergie du vide/Énergie noire
- Comment elle intervient en cosmologie
- Au début du Big Bang : L'inflation
 - Motivation
 - Conséquences
- L'univers actuel : L'expansion accélérée
- Perspectives

Constante Cosmologique/Énergie du vide

La constante cosmologique a été introduite par Einstein dans son équation pour permettre un univers statique.

$$G^{\mu,\nu} = 8\pi G T^{\mu,\nu} + \Lambda g^{\mu,\nu}$$

Gravitation Énergie Impulsion Constante Cosmologique

Mais Einstein la renie quand il comprend que l'univers est en expansion:
“La constante cosmologique est la plus grosse erreur de ma vie”
(cité par Gamow)

On peut aussi considérer la constante cosmologique comme composante dont la pression est l'opposé de la densité d'énergie : $p_\Lambda = -\rho_\Lambda = -\frac{\Lambda}{8\pi G}$

Exemple : champ scalaire d'énergie dans le vide non nul

$$\rho = \langle V(\Phi) \rangle_{\text{Vide}}, \quad p = -\langle V(\Phi) \rangle_{\text{Vide}}$$

Énergie noire

Plus généralement, on peut considérer une équation d'état

$$p = w \rho$$

Dans tous les exemples familiers $w \geq 0$: **rayonnement** : $w = 1/3$,
matière non relativiste : $w = 0$, **matière dégénérée** $w \propto \rho^{\gamma-1}$

Pour la constante cosmologique $w = -1$

En cosmologie

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho_{\text{tot}} - \frac{K}{a^2}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} = -\frac{4\pi G}{3} \rho_{\text{tot}} (1 + 3w_{\text{tot}})$$

Si la constante cosmologique est positive et dominante, ou plus généralement, si $w_{\text{tot}} < -\frac{1}{3}$ l'expansion est **accélérée**

C'est ce qu'on appelle **Énergie Noire**

L'expansion accélérée

On pense maintenant qu'à deux périodes de son histoire l'univers est en **expansion accélérée**.

I Au tout début, juste après le Big Bang : l'inflation.
Motivations initiales théoriques mais de plus en plus étayées par l'observation

II Actuellement,
pour des raisons purement observationnelles

L'inflation, pourquoi?

Pour résoudre d'un coup trois problèmes :

I La platitude

L'univers actuel est presque plat: $\Omega_0 = 1.02 \pm 0.02$ (plat $\Leftrightarrow \Omega = 1$)

Ce qui veut dire qu'il l'était beaucoup plus avant:

Nucléosynthèse : $\Omega - 1 \lesssim 10^{-16}$, GUT : $\Omega - 1 \lesssim 10^{-54}$.

D'où vient un ajustement aussi fin?

II Les reliques indésirables laissées par la physique des particules :

Monopoles de GUT, murs entre domaines de brisure de symétrie, gravitinos de la supergravité ...

Trop abondants ils refermeraient l'univers beaucoup trop vite.

III Le problème de l'horizon

Le rayonnement du CMB est uniforme sur tout le ciel à 10^{-5} près sur tout le ciel, alors que **des régions séparées de plus de 1° n'ont encore jamais pu interagir au moment de son émission.**

L'inflation, comment?

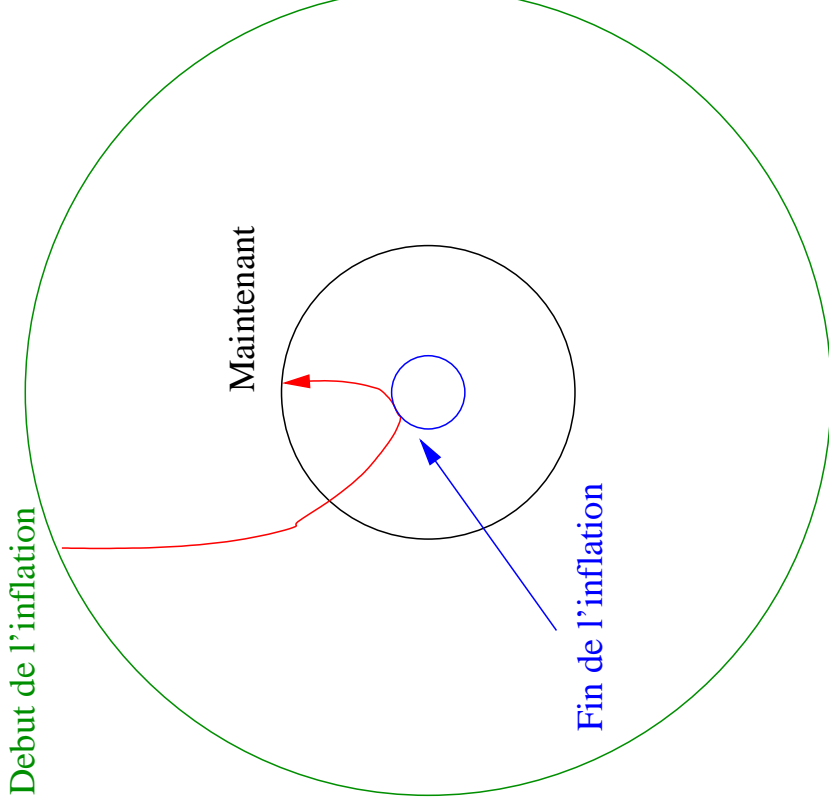
La taille comobile de l'horizon décroît lors de l'inflation.

L'inflation doit durer assez longtemps pour que la taille comobile de l'horizon avant l'inflation soit plus grande que celle de l'univers actuellement visible.

Pour cela l'inflation doit être d'un facteur 10^{20-30}

La taille comobile de l'horizon est $\simeq \frac{1}{a(t)H(t)} = \sqrt{|\Omega - 1|}$.
L'espace sort donc pratiquement plat de l'inflation

Les reliques indésirables sont diluées jusqu'à devenir inoffensives, si elles sont produites avant la fin de l'inflation.



L'inflation, comment?

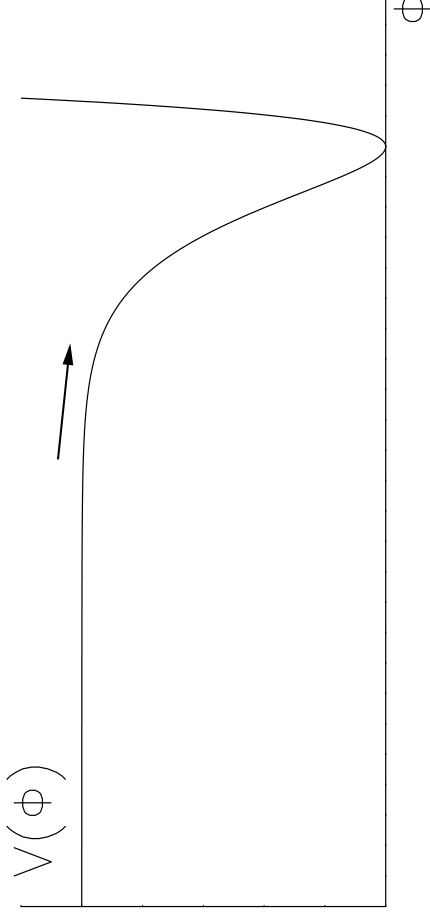
L'inflation est produite par un champ d'énergie dans le vide non nulle.

L'inflaton roule lentement vers le minimum de son potentiel.

Lentement:

La pente du potentiel est petite et varie peu.

Ceci est exprimé dans les paramètres de "slow roll"



$$\epsilon = \frac{M_p^2}{2} \left(\frac{V'}{V} \right)^2 \lll 1$$

$$\eta = M_p^2 \frac{V''}{V} \lll 1$$

La sortie de l'inflation se fait quand ϵ et η deviennent de l'ordre de 1

L'inflation, les conséquences

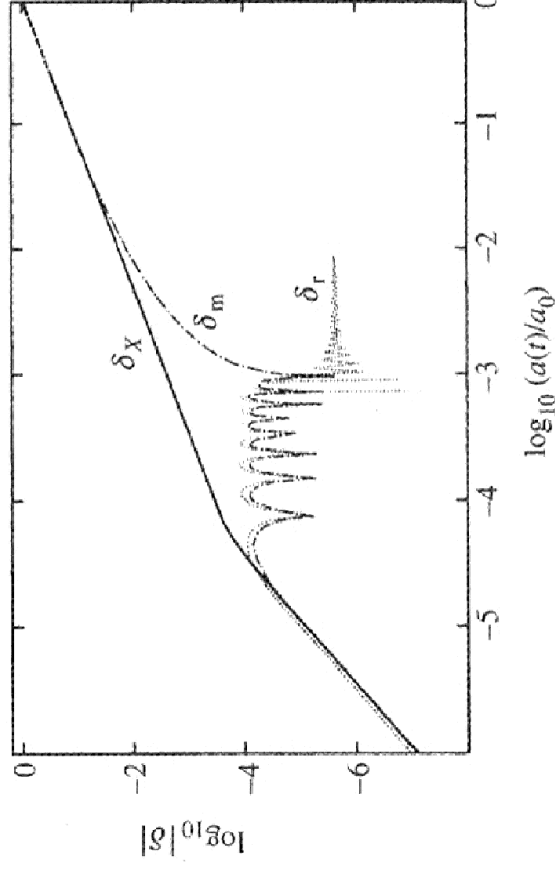
L'inflation fournit les graines des grandes structures de l'univers :

Les fluctuations quantiques de l'inflaton dilatées par l'inflation jusqu'à des tailles cosmologiques.

Ces fluctuations sont gaussiennes et d'indice spectral $n \simeq 1$

À l'époque de la recombinaison (émission du CMB), l'horizon grandit plus vite que les fluctuations

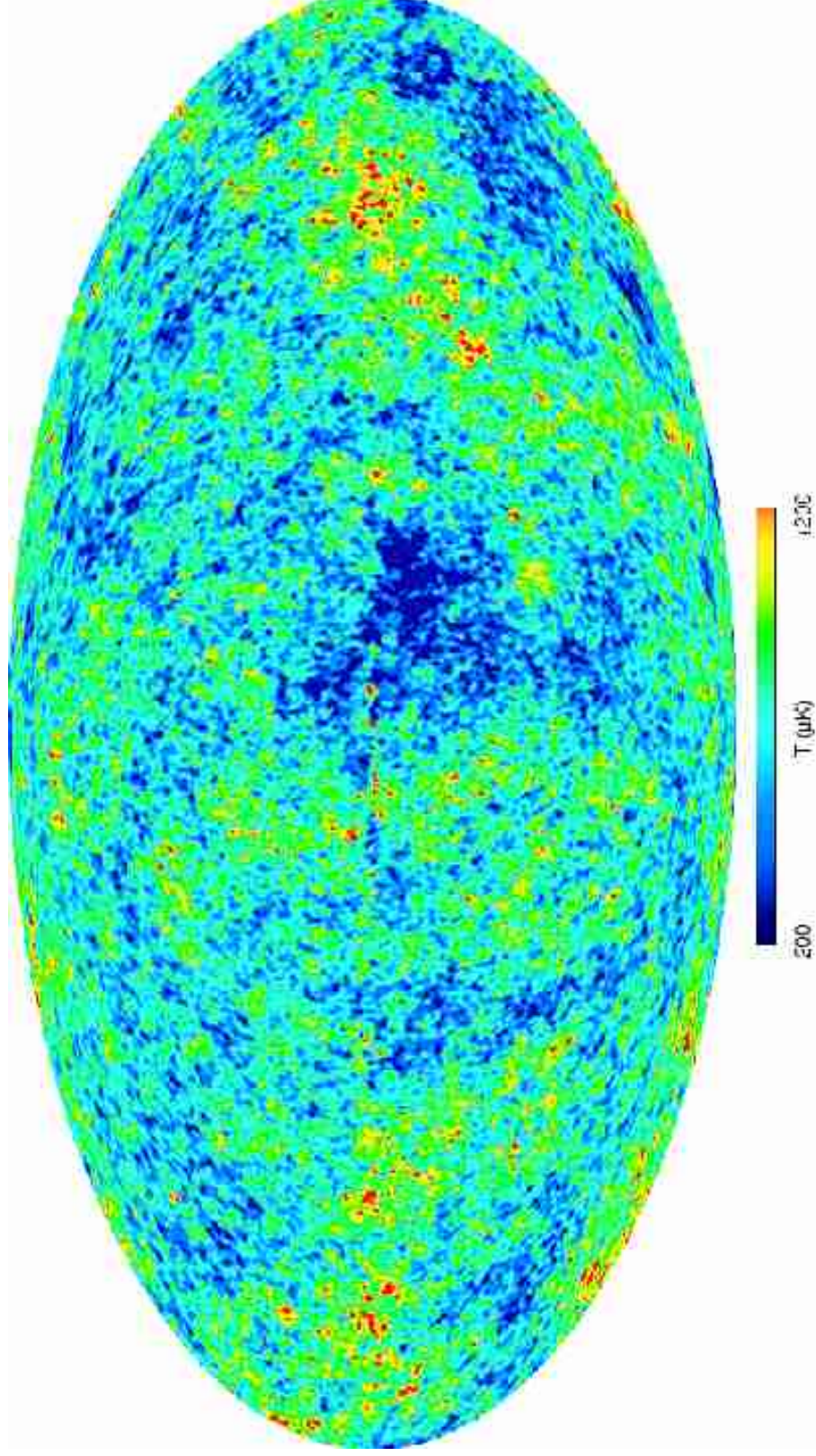
Les fluctuations d'une même taille "rentrent" dans l'horizon au même moment \Rightarrow Oscillations acoustiques cohérentes.



Le CMB Fournit une photographie de ces oscillations.

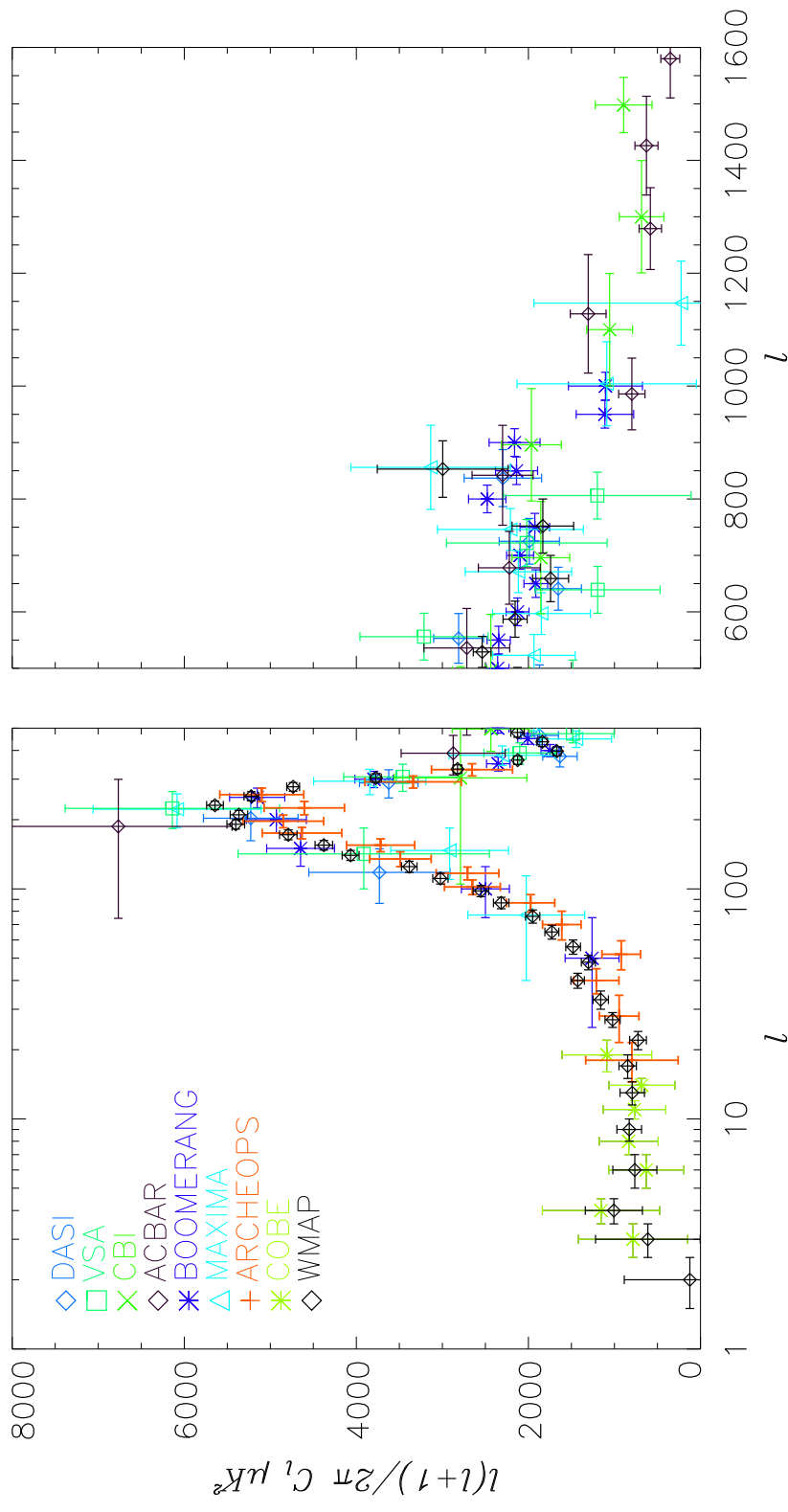
Les fluctuations du CMB

Le CMB observé par WMAP



Le spectre de puissance du CMB

Oscillation acoustiques cohérente \Rightarrow pics dans le spectre de puissance:



Le premier pic est à la taille de l'horizon ($l \simeq 200, \theta \simeq 1^\circ$).

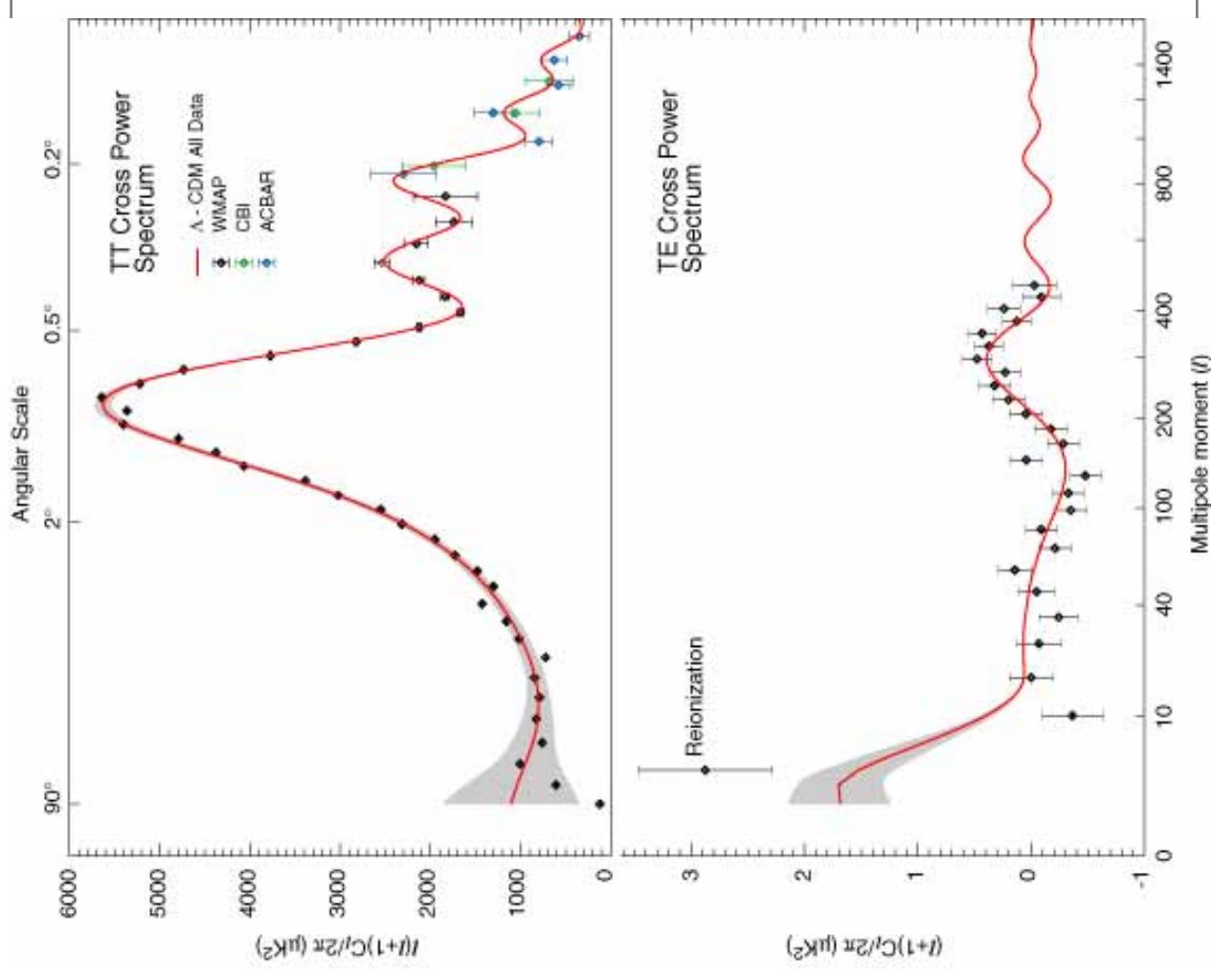
C'est sa position nous dit que l'univers est plat

Les spectres obtenus par WMAP

Les fluctuations du CMB sont polarisées dans 2 modes E et B

La corrélation négative dans le spectre croisé Temperature/Polarisation (TE) à $l \simeq 150$ signe la présence de fluctuations de taille supérieure à l'horizon, **prédites par l'inflation**.

Les courbes correspondent au meilleur ajustement du modèle d'univers sur le spectre TT seul.



Une image cohérente de l'univers

Les estimations de principaux paramètres cosmologiques à partir des données CMB de WMAP et du sondage profond 2dFGRS sont en accord avec des estimations de source complètement indépendantes.

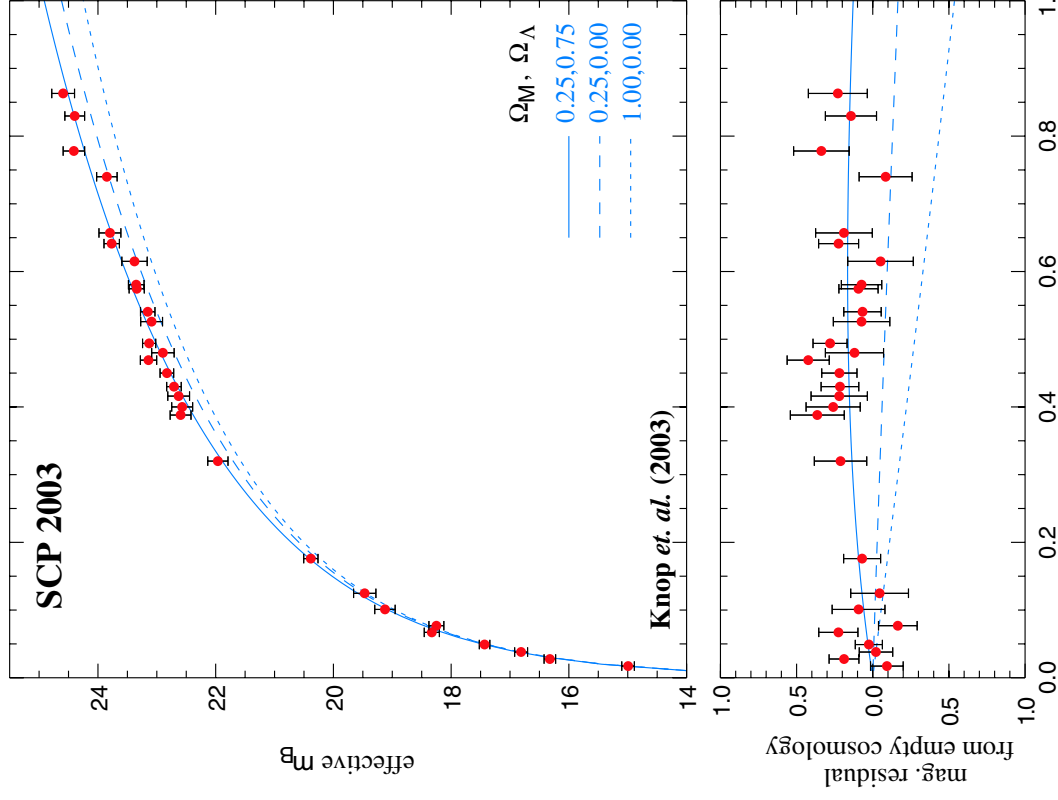
Paramètre	CMB +2dF	Autres	Origine
Ω_{tot}	1.02 ± 0.02		
Ω_{mat}	0.27 ± 0.04	$0.25^{+0.07}_{-0.06} \pm .04$	Supernovae ($\Omega_{\text{tot}} \equiv 1$)
Ω_{Λ}	0.73 ± 0.04	$0.75^{+0.06}_{-0.07} \pm .04$	id.
w	< -0.78 95%CL	$-1.05^{+0.15}_{-0.20} \pm .09$	id.
$\Omega_b h^2$	0.0224 ± 0.0009	$0.0223^{+0.0024}_{-0.0019}$	Abondance du Deutérium
H_0 /km/s/Mpc	71^{+4}_{-3}	$72 \pm 3 \pm 7$	HST key project

L'énergie noire domine et $w < -\frac{1}{3}$. L'univers actuel est **accélééré**.

C'est ce que nous disent les observations de supernovae lointaines depuis plusieurs années.

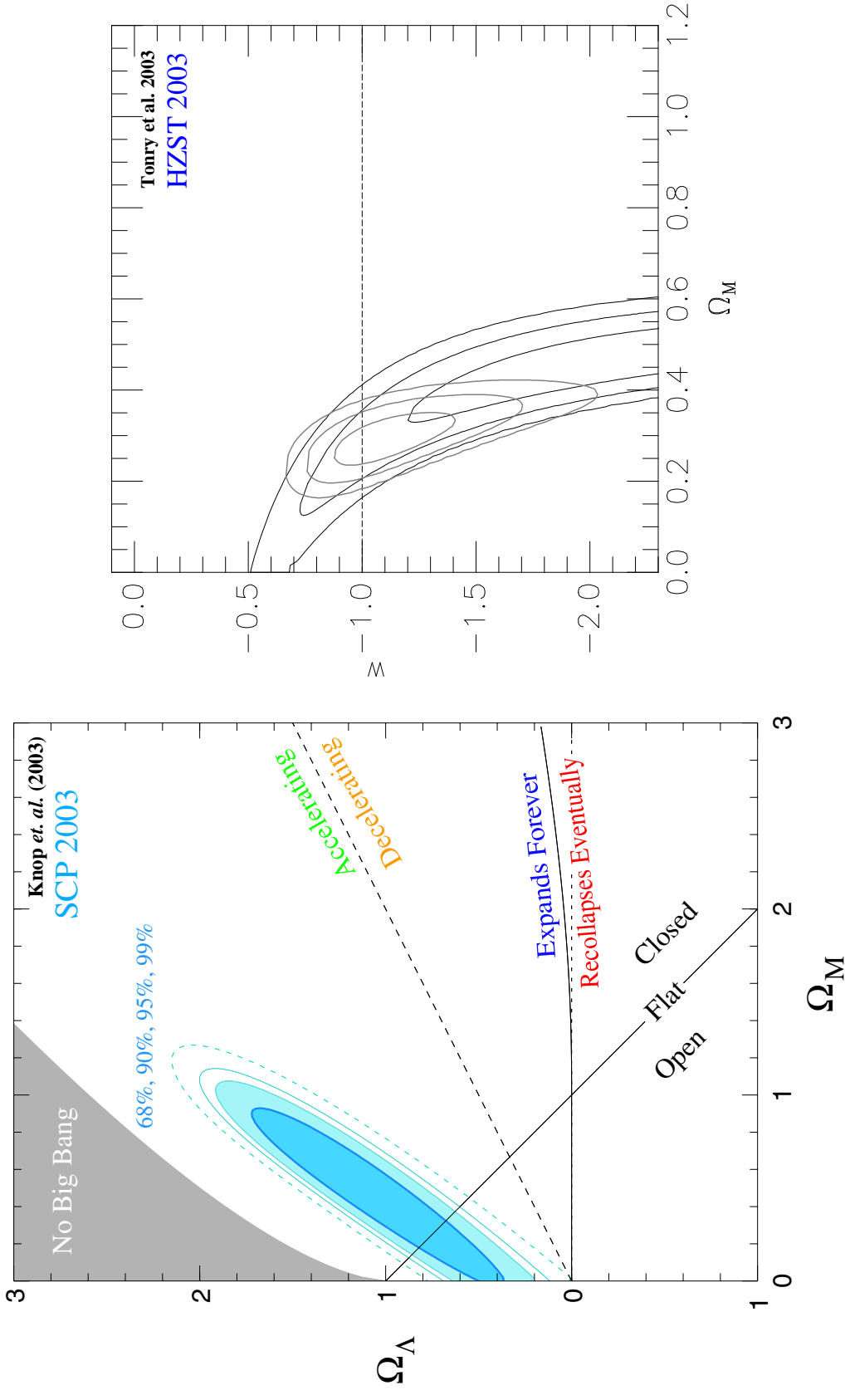
Les observations de Supernovae lointaines

Les supernovae de type 1a sont des chandelles standard, qui permettent d'étudier la luminosité apparente en fonction du redshift



Les observations de Supernovae lointaines

À partir de ces données, on peut tirer des contraintes sur Ω_{matiere} , Ω_{Λ} et w



D'où vient l'énergie noire actuelle? Le mot "quintessence" recouvre un ensemble de modèles théoriques imaginés pour l'expliquer.

Et maintenant, Pour l'inflation?

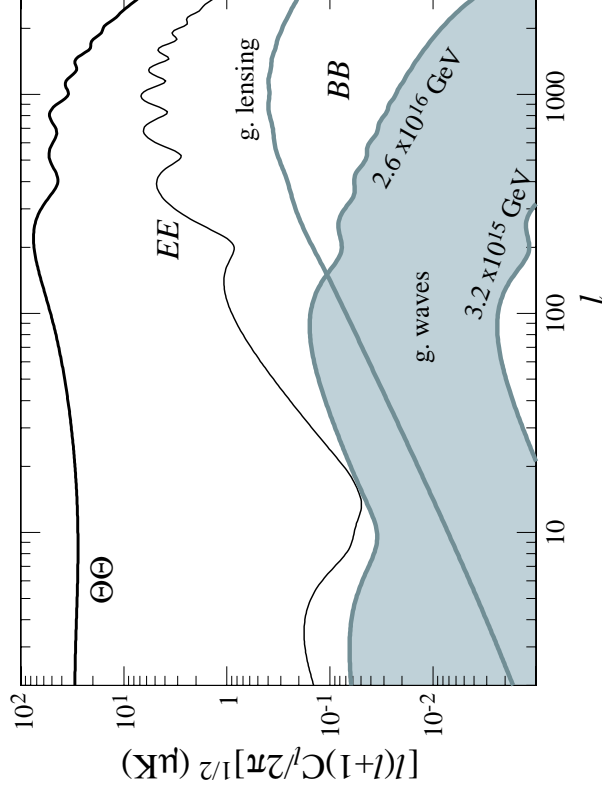
Le satellite **Planck** mesurera avec une grande précision des spectres **TT**, **TE**, **EE** du CMB et permettra de préciser les paramètres du potentiel de **l'inflaton** (et de comprendre mieux la réionisation.)

L'inflation produit un fond d'ondes gravitationnelles primordiales.

Ces ondes gravitationnelles polarisent les fluctuations du **CMB** d'une façon caractéristique: les modes **B** à grande échelle.

Mais ils sont très faibles et contaminés par l'effet de lentille des avant-plans.

De nombreuses expériences dédiées à la polarisation sont en préparation, et peut-être un satellite : "Inflation probe"



Et maintenant, Pour l'énergie noire actuelle

Le satellite à l'étude **SNAP** devrait permettre des progrès spectaculaires

