

L'Énergie Noire : Le mystère du XXI^{ème} Siècle.

**Discussion « Critique » autour des Principes
Fondamentaux de la Cosmologie Moderne
Nature des composantes invisibles de notre Univers**

Vers un nouveau paradigme cosmologique ?

Jean-Michel Alimi

Laboratoire Univers et Théories

SAF - Cosmologie

15 Janvier 2011

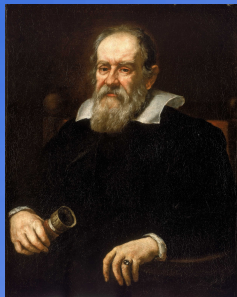
Plan

- **Les Principes fondamentaux de notre paradigme cosmologique et « le modèle de concordance »**
 - **Le Principe de Covariance Généralisé - Le Principe d'Équivalence - Le Principe Cosmologique**
 - **Le Modèle Standard de la Physique des Hautes Énergies et ses extensions**
 - **Le Modèle standard de la cosmologie: « Le Modèle de Concordance ».**
- **L'Énergie Noire**
 - **Évidences Observationnelles**
 - **Quelles Interprétations Théoriques ?**
- **Nature de l'Énergie Noire**
 - **Pourquoi l'énergie noire ne peut être simplement une constante cosmologique ?**
 - **L'énergie noire, un nouveau substrat. Au delà de notre connaissance de l'infiniment petit.**
 - **L'énergie noire, une nouvelle vision de l'Univers. Au delà du principe cosmologique**
 - **L'énergie noire, une nouvelle conception de la gravitation. Au delà du principe d'équivalence.**
- **Les moyens de conclure ?**
 - **Signature de l'énergie noire sur la structuration de notre univers.**
- **Conclusion ?!**

Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

Le Principe de Covariance généralisé :

Généralisation conceptuelle:



- Mécanique classique (Invariance de Galilée): Transformations de Galilée laissent invariante la distance calculée par le théorème de Pythagore $dl^2 = \delta_{ij} dx^i dx^j$ et réciproquement.
- Relativité Restreinte (Invariance de Lorentz): Transformations de Lorentz laissent invariante le temps propre de Minkowski $d\tau^2 = -\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = c^2 dt^2 - dx^2$ et réciproquement



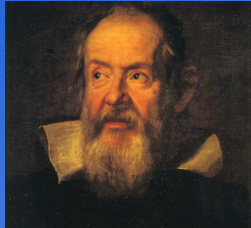
- Relativité Générale: Les équations préservent leur forme sous une transformation générale des coordonnées: Invariance par difféomorphisme, le temps propre $d\tau^2 = -g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ est conservé ($g_{\mu\nu}$ le tenseur métrique)

**La RG se donne pour objectif de construire
une description de la nature invariante dans tout système de coordonnées.**

La représentation de l'espace-temps, et des interactions fondamentales; formalisme tensoriel

Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

Le Principe d'équivalence:



Support expérimentale

$M_{\text{inertielle}}$ (résistance au mouvement) = M_{grave} (définit le mouvement des corps massifs)

Fortuit en Mécanique Classique: Etvös (1889), Dicke (1964): 10^{-12} , STEP : 10^{-17}



Tous les corps tombent de la même façon, il est possible de supprimer localement l'effet d'un champ gravitationnel, identification de la gravitation avec la courbure locale

PE faible / PE d'Einstein

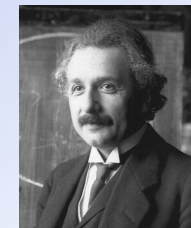
*Universalité de la chute libre, quelque soit les énergies de liaison non gravitationnelle.
Les lois de la physique sont en tout point de l'espace temps les lois données par la relativité restreinte.*

PE fort.

Universalité de la chute libre, quelque soit les énergies de liaison y compris gravitationnelle.

La RG confond tous ces énoncés

L'origine et la nature de la masse.



Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

Le Principe d'Équivalence et Le Principe de Covariance Généralisée fondent la Relativité Générale.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

**Espace-Temps-Matière,
Identifie la forme au substrat (géométrie/contenu énergétique)**

**Description locale (Λ !);
Seul la courbure de l'espace-temps est effective,
une même courbure est ressentie identiquement en tout point (G=Cst).**

Appliquée à l'Univers: L'univers est dynamique, il est en expansion

Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

Le Principe Cosmologique:

Il exprime le principe de Copernic:

Nous n'occupons pas de place privilégié dans l'Univers (dans l'espace).

- Nécessaire en premier lieu
- Simplificateur
- Support Observationnel: *CMB + Survey de Galaxies + Champs de Vitesses*

**Notre Univers est Homogène et Isotrope
(aux grandes échelles > 100 Mpc)**

$$d\tau^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

**Ce principe permet rigoureusement de définir un temps cosmique,
la dynamique de l'Univers (homogène et isotrope) est donné seulement à travers $a(t)$,
les équations d'Einstein se simplifient**

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G \sum_i \rho_i}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \sum_i (\rho_i + 3P_i)$$

Existence d'un Big-Bang, l'univers observé / l'univers réel.

Les Principes fondamentaux du paradigme cosmologique

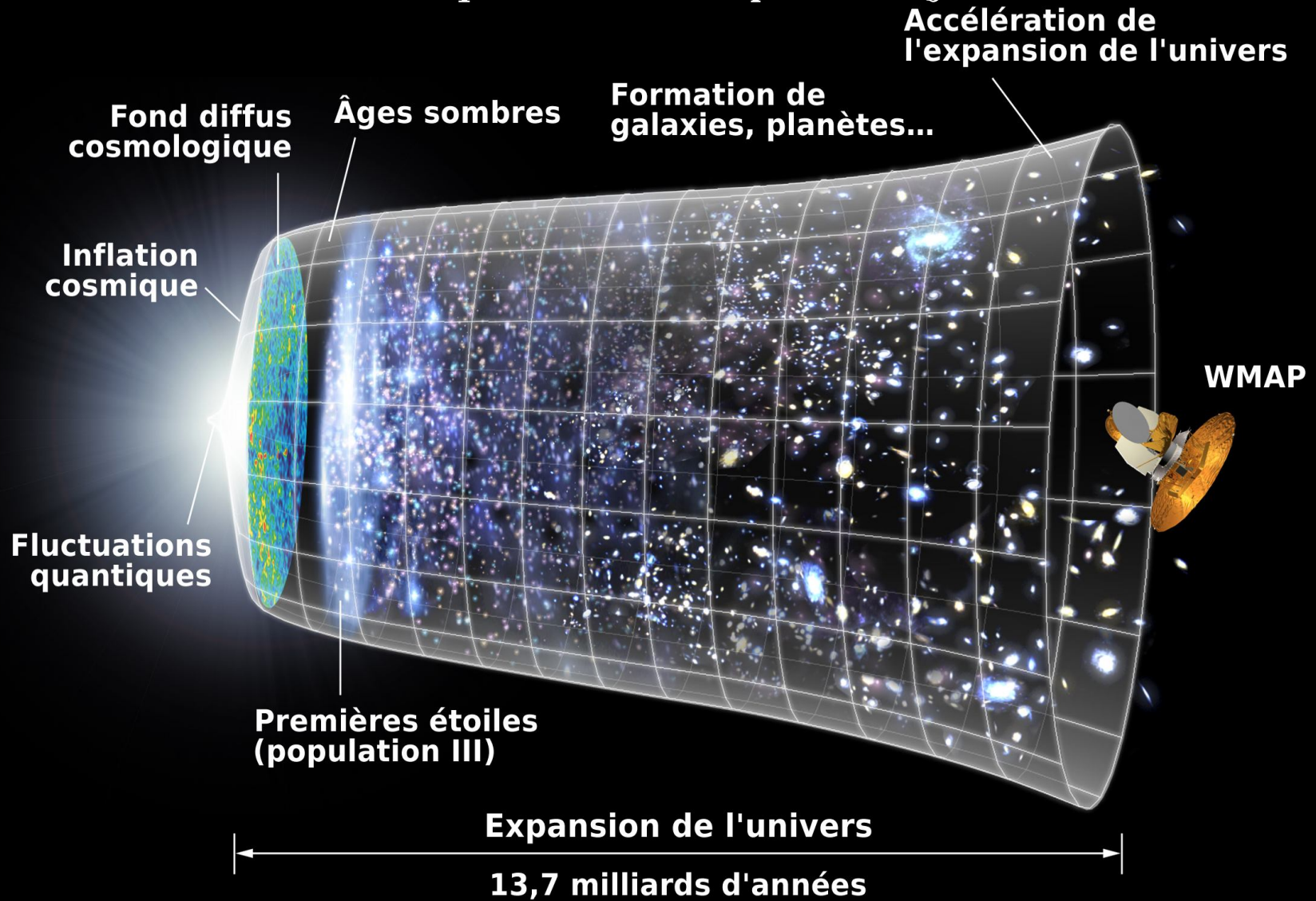
Principe de Covariance Généralisé
+ Principe d'Équivalence
+ Principe Cosmologique
+ Modèle standard de la Physique des Hautes Énergies

C'est dans ce cadre théorique que s'élabore
le modèle standard dit de *concordance* de la cosmologie moderne.

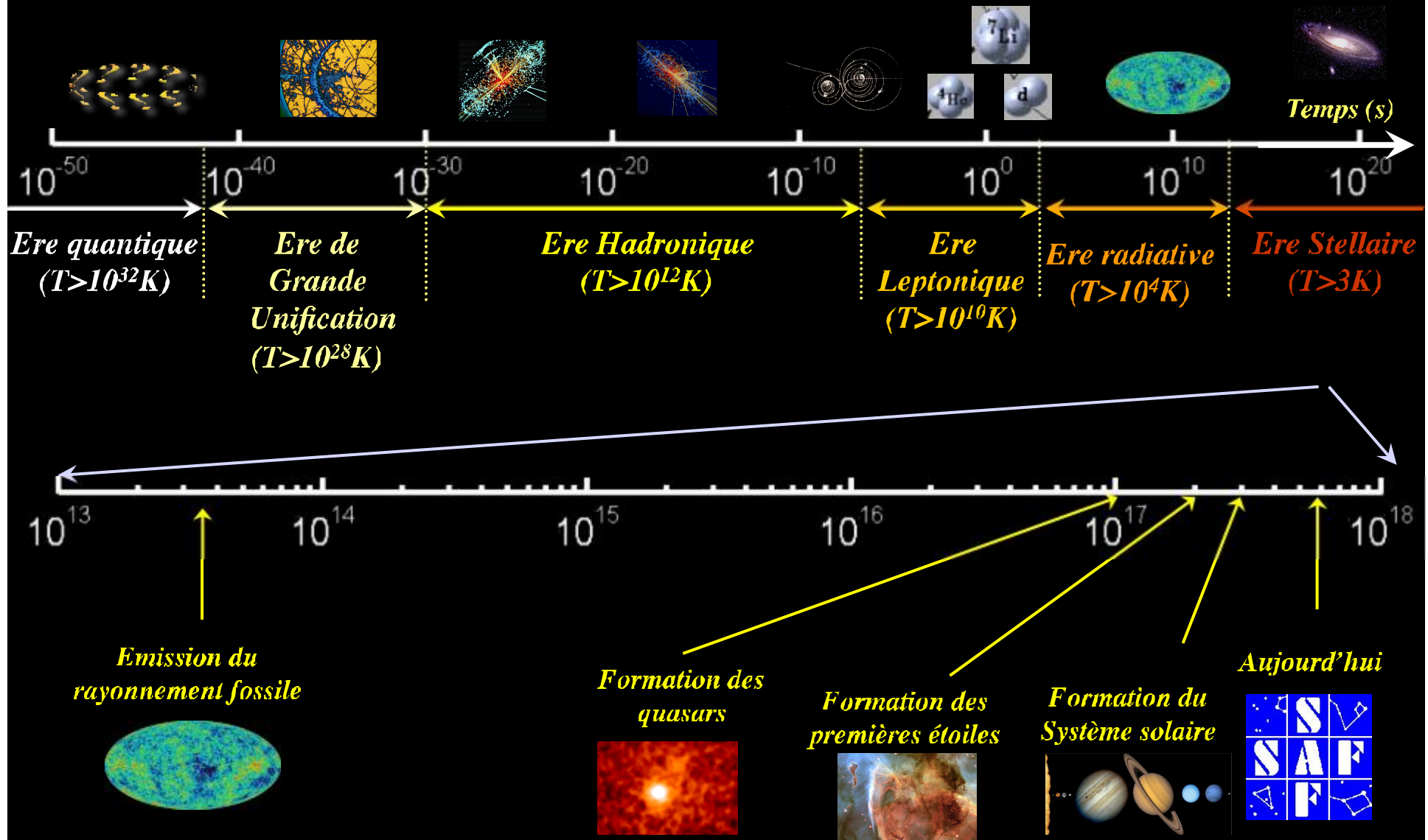
Le modèle de concordance rend compte des propriétés de notre Univers de la taille
de l'Univers observable jusqu'à moins d'un dixième de la taille d'une galaxie
(10 ordres de grandeurs, de la dizaine de Gpc à environ 1 kpc)...

... mais des questions fondamentales restent posées.

Le modèle de « Concordance » :
Un univers en expansion dominé par l'énergie noire...

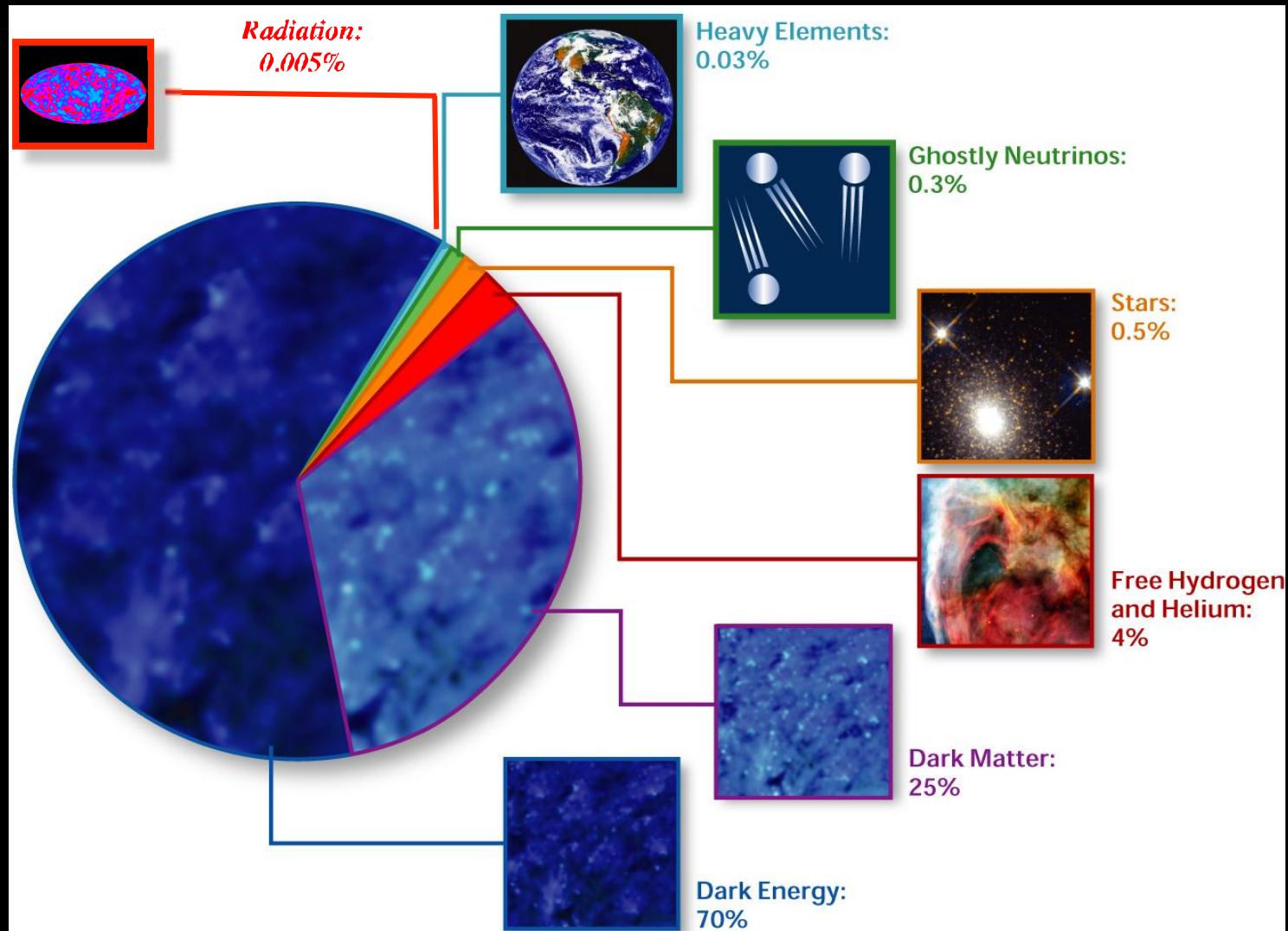


Le modèle de « Concordance »: Les premiers instants...



Le Modèle de « Concordance »

Il établit le contenu énergétique suivant (aujourd'hui) ...
Un univers essentiellement invisible

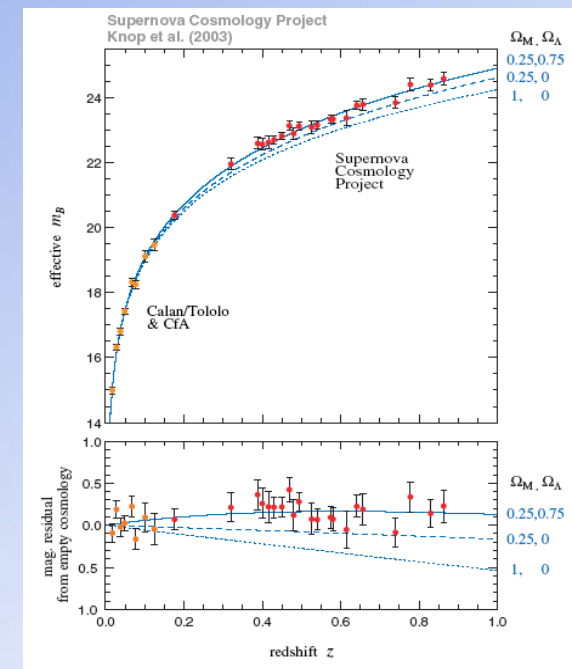
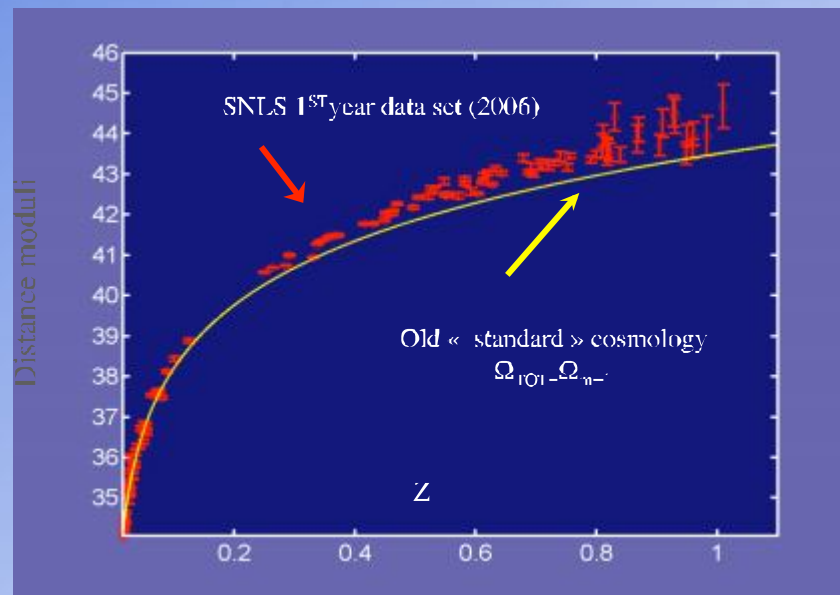


L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Les Supernovae de Type Ia apparaissent plus faiblement lumineuses qu'attendues.

- Chandelles standards ?
- Le rapport de leur luminosité intrinsèque (supposée connue) et de leur luminosité apparente fixe la distance-luminosité (d_L) des supernovae, le redshift z peut être indépendamment mesuré par spectroscopie.
- Finalement, on obtient $d_L(z)$ ou de façon équivalente la magnitude(z) et on peut alors tracer un diagramme de Hubble (mesure direct du facteur d'accélération)

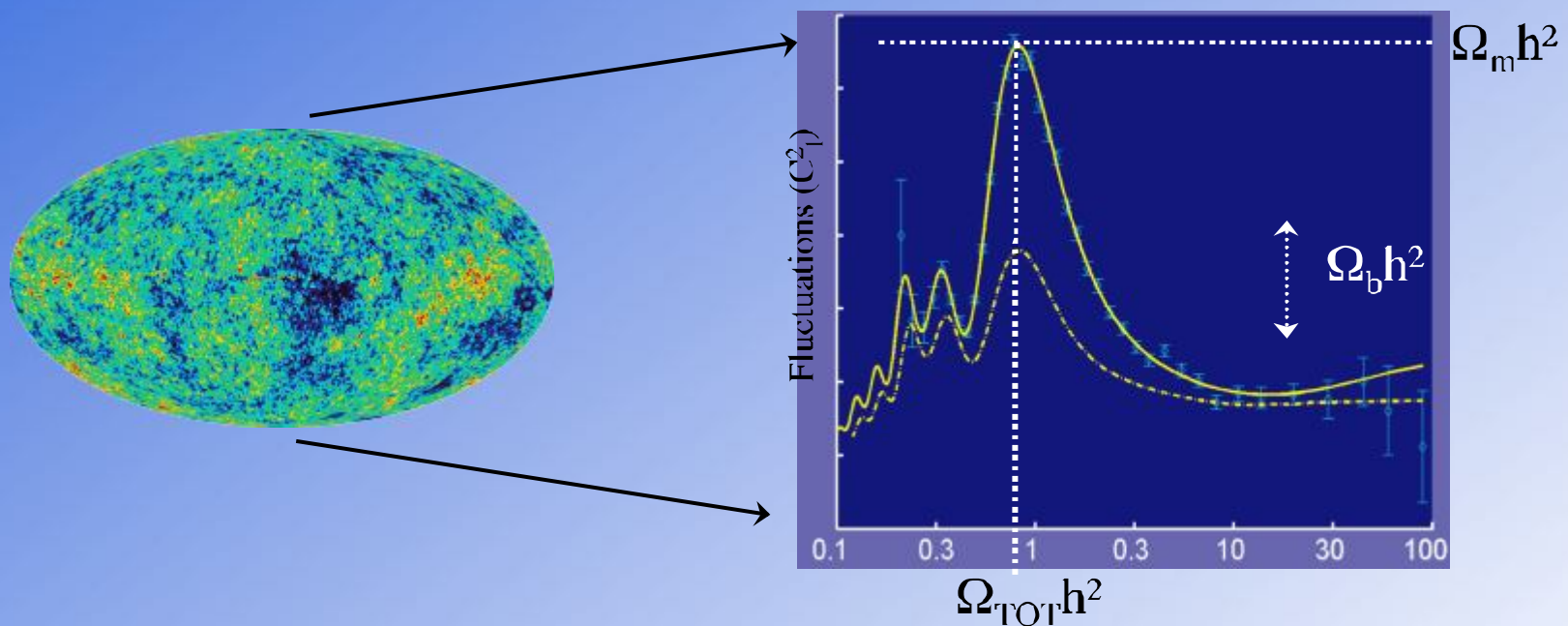
L'expansion cosmique a récemment accéléré ou (et?) les supernovae ne sont pas des chandelles standards



L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Evidence déduite de l'analyse du fond de rayonnement cosmologique (CMB)

- L'analyse des anisotropies du fond de rayonnement cosmologique à $T=2.725\pm 0.002$ K est un puissant outil pour déterminer les paramètres cosmologiques.



Géométrie: Espace Plat ($\Omega_T \sim 1$),

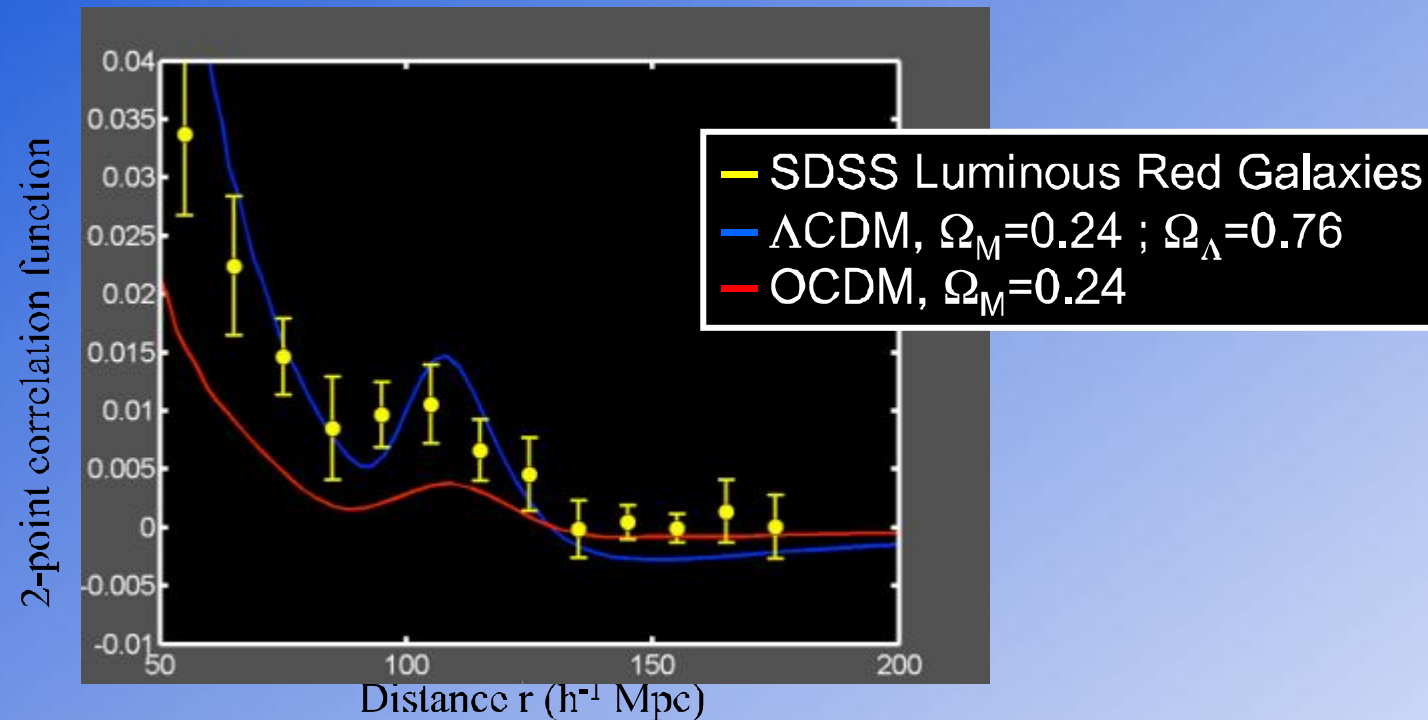
Contenu Présent de l'Univers: Matière : $\sim 30\%$ avec Baryons: $\sim 5\%$

\Rightarrow Matière Noire : $\sim 25\%$, \Rightarrow Énergie Noire Manquante: $\sim 70\%$!

L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Nombreuses autres mises en évidence observationnelles: BAO, LSS, WL ...

- BAO



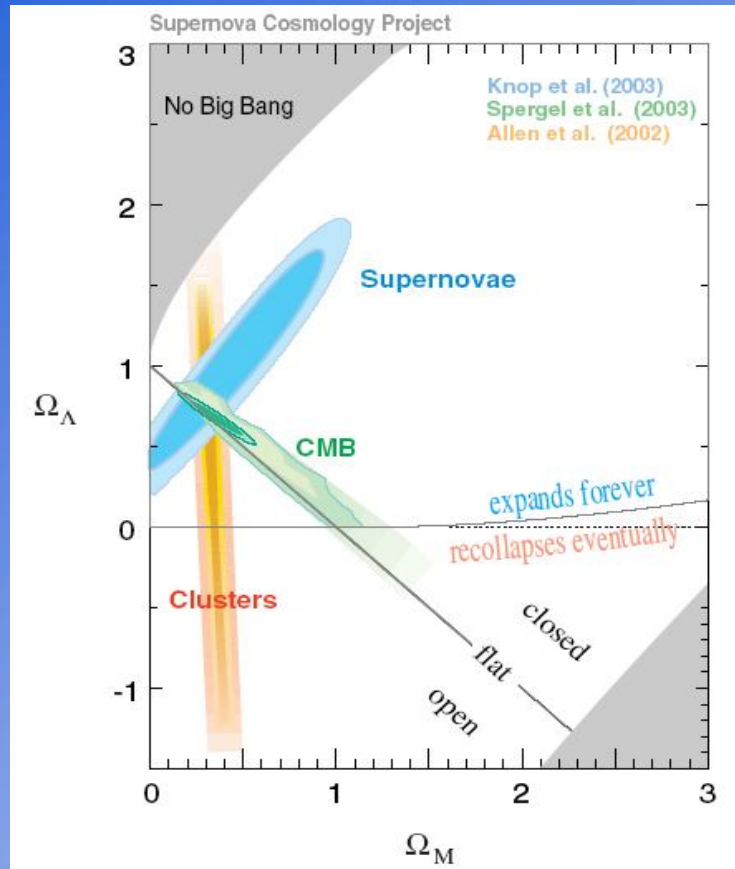
- Large-Scale distribution of galaxies (Power Spectrum)

2dFGRS : $0.65 < \Omega_\Lambda < 0.85$ (95% C.L.), SDSS: $\Omega_M = 0.24 \pm 0.02$ (95% C.L.)

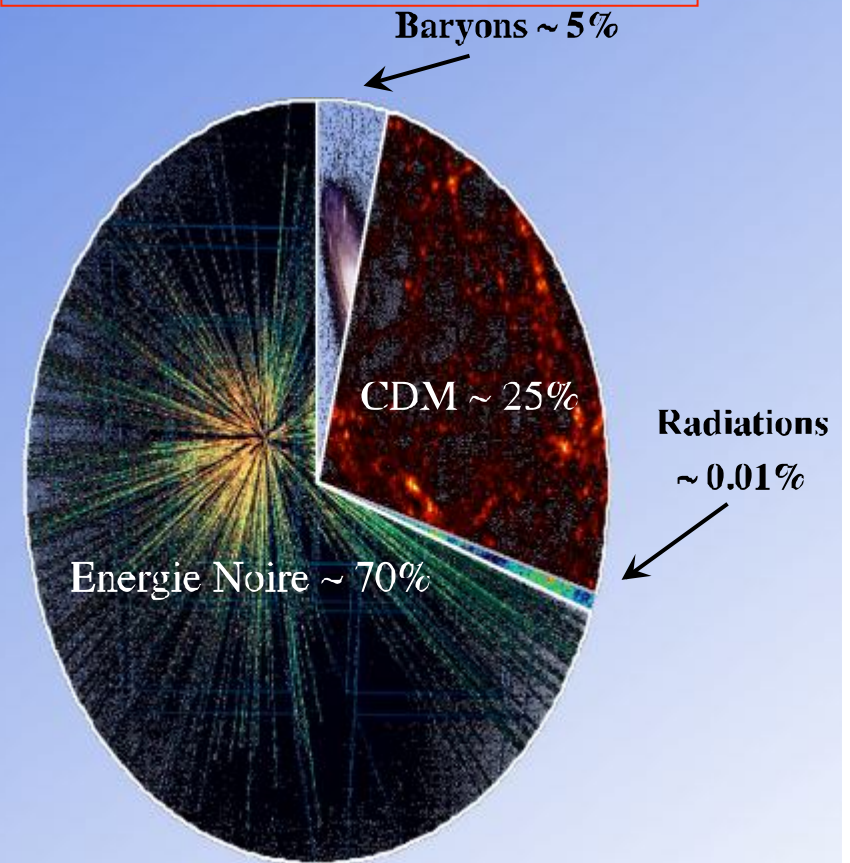
- Le comptage des amas de galaxies permet d'inférer la densité de matière dans l'Univers, on obtient $\Omega_M \sim 0.3$

L'Énergie Noire: Évidences Observationnelles

Complémentarité Cosmique



Le Modèle de Concordance Λ CDM



Matière noire ?! Energie Noire ?!

Nature de l'Énergie Noire ?

Elle pose la question du Paradigme Cosmologique

- Principe de Covariance
- Principe d'Équivalence
- Principe Cosmologique : La dynamique de l'Univers est donnée seulement à travers $a(t)$

} RG

$$G_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}, \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P)$$

Nouvelle Composante
énergétique (ρ) qui s'ajoute
à la ML et à la MN:
Violation de la condition
forte d'énergie

$$\ddot{a} > 0 \text{ si } p < -\frac{\rho}{3}$$

Au delà du Modèle Standard
de l'infiniment petit

L'hypothèse "Théorie De
la Relativité Générale
d'Einstein" est conservée

Au delà du principe
cosmologique

Nouvelle vision de
l'Univers.

Extensions de la RG!

Au delà du principe
d'équivalence

Interprétation
Géométo-dynamique de
l'énergie noire

3 interprétations \Rightarrow 3 axes de recherches

Nature de l'Énergie Noire (1) : La Constante Cosmologique Λ ?

- Λ a été historiquement introduit par Einstein en 1917 comme un terme inspiré du principe de Mach
- Cette solution ne requière ni remise en cause de la RG , ni remise en cause du principe cosmologique et de plus elle rend compte des effets d'énergie noire avec seulement 1 paramètre supplémentaire.
- Cependant quelle est la nature de Λ ?
 - $P_\Lambda = -\rho_\Lambda$
 - Énergie Noire homogène, Il n'y a pas d'interaction avec la matière et par conséquent seul l'expansion cosmique est modifiée.
 - Elle s'interprète habituellement comme les fluctuations du vide, mais se pose alors le pb de la régularisation !

$$\rho_\Lambda = 8\pi G \langle T_{00} \rangle_{vac} \propto \int_0^\infty \sqrt{k^2 + m^2} k^2 dk = ? \quad \left\{ \begin{array}{l} \infty ? \\ 10^{76} \text{ GeV}^4 \text{ (régularisées à l'échelle de Planck)?} \\ 10^{-3} \text{ GeV}^4 \text{ (régularisées à l'échelle QCD) ?} \end{array} \right.$$

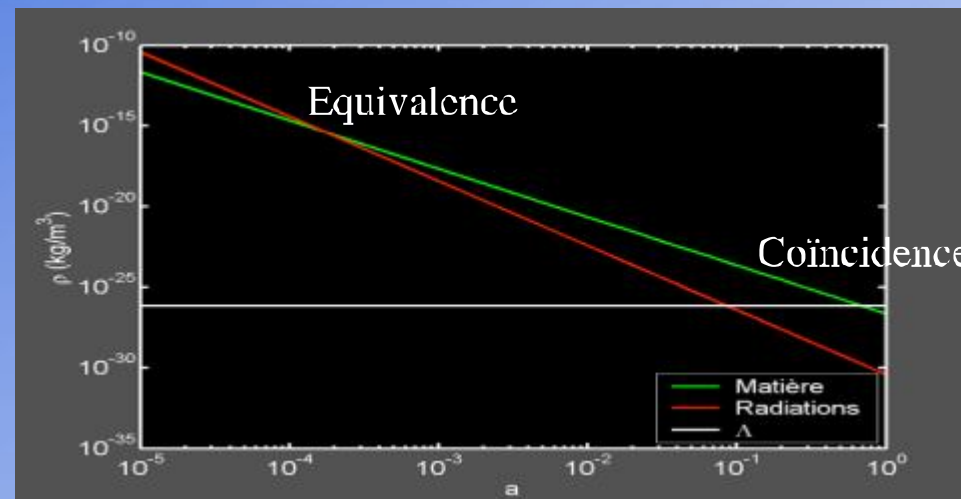
$$\rho_\Lambda^{obs} \approx \rho_{c,0} \approx 10^{-47} \text{ GeV}^4$$

Ce n'est pas un réel Problème:
Constante d'intégration additive dans les équations d'Einstein / Énergie du Vide (SUSY ?)

Nature de l'Énergie Noire (1) : La Constante Cosmologique Λ ?

Le problème de la coïncidence !

- ρ_{Λ}^{obs} est très différent de toutes les autres échelles connues en physique dans le modèle standard, Pourquoi Λ est si petit ? (Λ est elle réellement constant ?)
 - Nous vivons à une époque (très) particulière dans l'histoire de notre Univers: à un moment où la constante cosmologique commence à dominer le contenu énergétique de notre Univers.



- On peut donc s'attendre à ce que la solution à ce problème soit tout-à-fait différente de la simple et plutôt naïve constante cosmologique Λ
- On préférera un **mécanisme cosmologique** pour justifier la valeur observée de la constante cosmologique.
 - « Quintessence » constitue une telle explication alternative à l'énergie noire (Λ variable)

L'Energie Noire
Une origine Microscopique !?

Nature de l'Énergie Noire (1) : Un nouveau substrat

Au delà de notre compréhension de l'infiniment petit: la quintessence ...

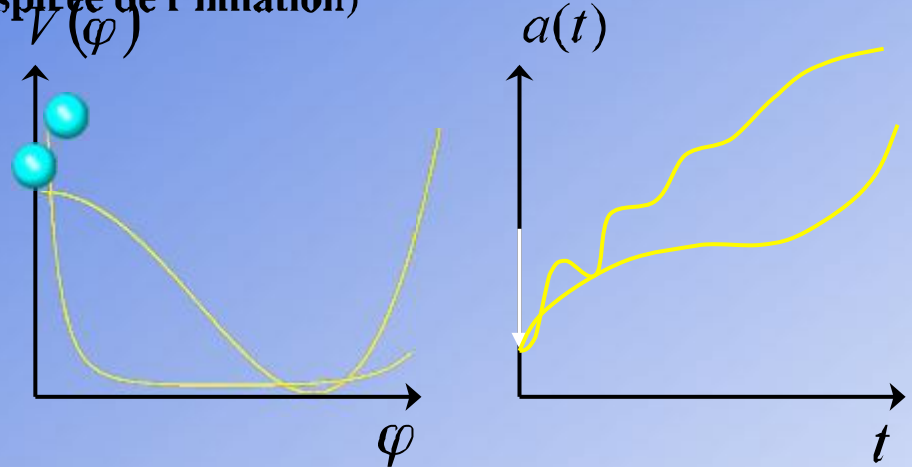
Quintessence (champ « scalaire ») (physique inspirée de l'inflation)

- EN dynamique, ρ_Q varie avec le temps

$$\rho_Q = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi), p_Q = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi)$$

$$V(\phi) = V_0 f(\phi)$$

- EN inhomogène : $\exists \delta\phi(k,t) \neq 0$ (CMB)



Energie Noire comme une violation de la condition forte d'énergie

$$\ddot{a} > 0 \text{ if } p_Q < -\frac{\rho_Q}{3} \quad (\dot{\phi}^2 \ll V(\phi))$$

Origine microscopique de cette violation !
J'y reviendrai par la suite.

**L'Accélération de l'Univers
Une origine géométrique !?**

Nature de l'Énergie Noire (2) : Au delà du principe cosmologique...

Le Principe Cosmologique « Fort » : Les Univers de Friedmann

- Ces modèles ignorent les inhomogénéités : L'espace est considéré localement homogène et isotrope
- L'espace admet une symétrie maximale : Les sections spatiales sont à courbure constante k
- La dynamique de l'univers est solution d'une équation différentielle du second ordre sur le facteur d'échelle $a(t)$: L'équation de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i$$

- Les distances sont calculées à l'aide de l'élément longueur spatio-temporelle

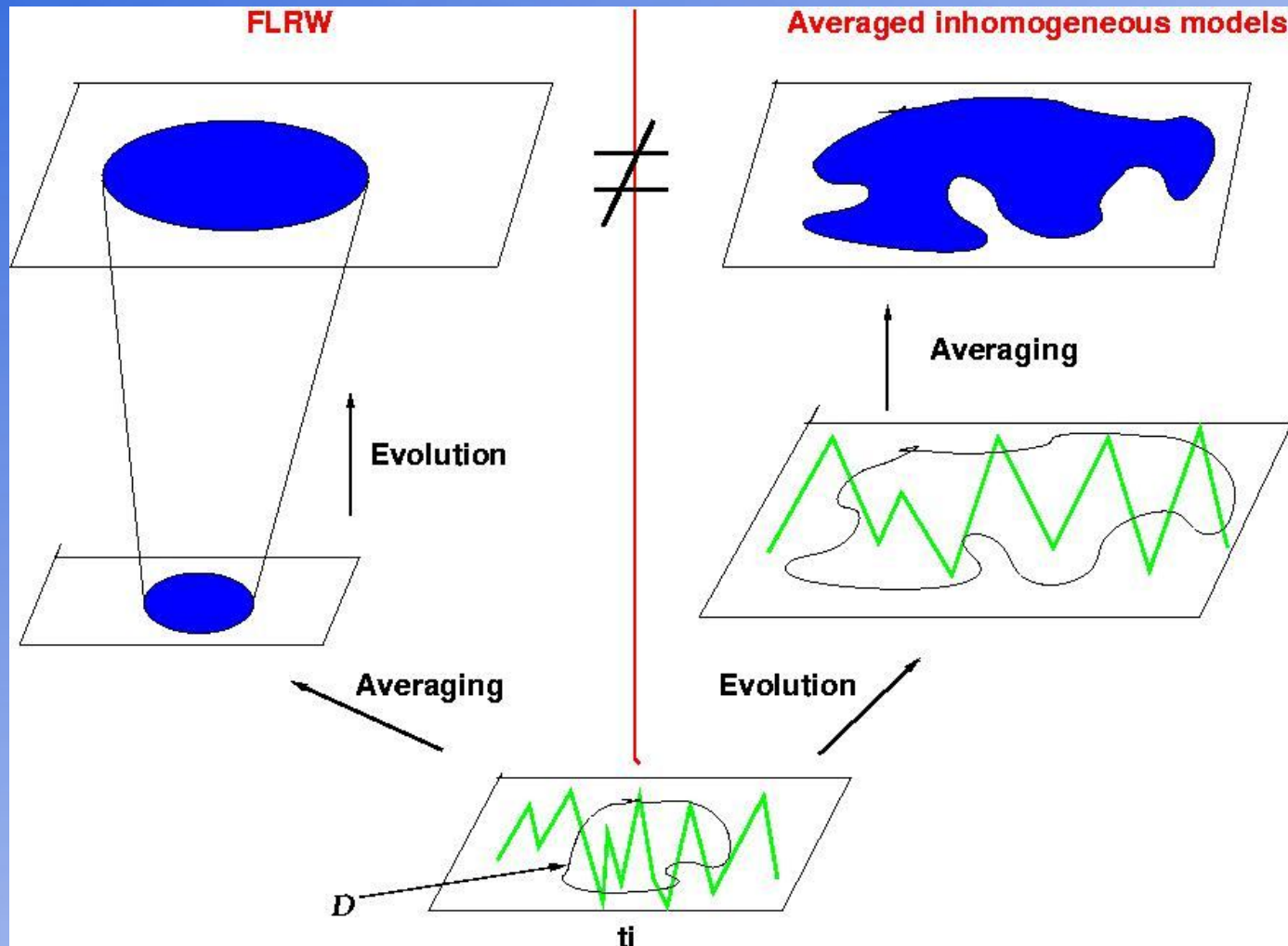
$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)dl^2$$

- La formation des structures résultent de la croissance de fluctuations qui n'impriment aucune trace (en retour) sur la métrique qui restent homogène et isotrope.
- Les propriétés de l'univers primordial et en particulier les propriétés du CMB sont correctement obtenues.

Cette description est elle encore valable pour décrire (tout au moins) les phases tardives de l'univers fortement structuré ?

Faire évoluer la moyenne où Moyenner l'évolution ?

$$\left[\partial_{t_i}, \langle \cdot \rangle_D \right] \neq 0$$



Nature de l'Énergie Noire (2) : Au delà du principe cosmologique...

Le Principe Cosmologique « faible »

- Nous ne conservons que l'hypothèse d'homogénéité aux grandes échelles, au sens où les observables sur les grandes échelles se déduisent de fonctions uniquement dépendante du temps.
- Mais aucune hypothèse n'est faite sur l'homogénéité de la structure locale de l'espace-temps et sur la distribution de matière.
- **La dynamique locale obéit donc aux équations générales d'Einstein et non aux équation d'Einstein une fois simplifiée par l'application du principe cosmologique**

**Comment définir un modèle homogène:
Nécessité d'une procédure de moyennisation ?**

Observer c'est moyenner

Quelles sont alors les équations dynamique ?

Violation du Principe Cosmologique Fort:

Définition des quantités moyennées et Dynamique des Quantités moyennées

Procédure de Moyennisation: Observer c'est moyenner !

- Choisir un domaine D de volume:

$$V_D(t) = \int_D J d^3x \quad , \quad J = \sqrt{\det(g_{ij})}$$

- Cela définit un facteur d'échelle effectif: $a_D(t) = \left(\frac{V_D(t)}{V_{D_0}} \right)^{1/3}$

- De façon générale, l'opération de moyennisation d'un scalaire: $\langle \gamma \rangle_D = \frac{1}{V_D} \int_D \gamma J d^3x$

Nous appliquons cette procédure de moyennisation aux équations dynamiques .

Les équations moyennées effectives: Elles « miment » un univers homogène à « quelques corrections prêtes ».

$$H_D^2 = \left(\frac{\dot{a}_D}{a_D} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \langle \rho \rangle_D - \frac{1}{6} (Q_D + \langle R \rangle_D) \quad , \quad \frac{\ddot{a}_D}{a_D} = -\frac{4}{3} \pi G \langle \rho \rangle_D + \frac{1}{3} Q_D$$

$$\langle \rho \rangle_D = \rho_{D_i} a_D^{-3} \quad , \quad \partial_t Q_D + 6H_D = -\partial_t \langle R \rangle_D - 2H_D \langle R \rangle_D$$

Où le paramètre de Hubble effectif est: $H_D = \frac{\dot{a}_D}{a_D}$

La 3-courbure moyenne: $\langle R \rangle_D$

Le terme de fluctuation décrit les « backreactions » cinématiques: Q_D

Violation du Principe Cosmologique Fort:

« The Morphon Field » comme source d'Énergie Noire

$$H_D^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(\langle \rho \rangle_D + \frac{\varepsilon}{2} \dot{\Phi}_D^2 + U(\Phi_D) \right)$$

$$\frac{\ddot{a}_D}{a_D} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\langle \rho \rangle_D + 2\varepsilon \dot{\Phi}_D^2 - 2U(\Phi_D) \right)$$

$$\ddot{\Phi}_D + 3H_D \dot{\Phi}_D + \varepsilon \frac{dU(\Phi_D)}{d\Phi_D} = 0$$

Les termes liés aux inhomogénéités sont réécrits en terme d'un champ scalaire de nature géométrique

$$-\frac{1}{8\pi G} Q_D = \varepsilon \dot{\Phi}_D^2 - U(\Phi_D)$$

$$-\frac{1}{8\pi G} \langle R_D \rangle = 3U(\Phi_D)$$

- a_D accélère si $Q_D > 4\pi G \langle \rho \rangle_D$
- $Q_D V_D$ croît avec les fluctuations du taux d'expansion.
- Nous disposons d'une solution au problème de la coïncidence
- **Les Fluctuations sont elles suffisantes pour expliquer l'ampleur de l'accélération observée aujourd'hui ?**

Violation du Principe Cosmologique Fort:

**L'Énergie noire serait (alors) un pure effet
géométrique : « The Morphon Field »**

Nature de l'Énergie Noire (2) : Au delà du principe cosmologique...

Le Principe Cosmologique « Fort », le Principe cosmologique « faible »

- Un statut d'observateur totalement nouveau !
- Un « tout » univers surprenant !
- En effet!

L'Univers homogène effectivement observé n'est qu'un « domaine » du « tout » Univers, sa dynamique devient propre à ce domaine.

Mais quid de la dynamique, de l'origine, du destin... d'autres « domaines » et de la somme de ces « domaines » du « tout » Univers ou de l'Univers « tout entier ».

L'Accélération de l'Univers
Une origine géométrico-dynamique !?

Nature de l'Énergie Noire (3) : Au delà du principe d'équivalence...

Principe d'équivalence:

Principe d'équivalence faible. Il semble inenvisageable de le contester (10^{-12}).

Principe d'équivalence fort: $G(t)$

Une théorie de la Gravitation sans principe d'équivalence fort.

De nombreuses tentatives, Jordan 1949, Fierz 1956, Brans & Dicke 1961

La métrique $g_{\mu\nu}$ est insuffisante pour décrire l'espace-temps

On y additionne un degré de liberté scalaire ϕ (courbure+positionnement $G(x_\mu)$).

Le champ ϕ et la métrique sont fortement couplés, la RG est un cas limite.

La théorie satisfait le PE faible mais G n'est plus constant ($G \sim 1/\phi$), la théorie viole le PE Fort,

Les théories scalaire-tenseurs ainsi définies peuvent également s'envisager comme une

- Nouvelle Formulation des Théories à dimensions supplémentaires
- Approximation basse-énergie du secteur gravitationnelle de la théorie des supercordes (Unification des Interactions)
- ...
- « Peut-être vue comme une théorie « effective minimale » de toute extension non-locale de la RG »
- La partie matériel S_M est inchangée, la partie gravitationnelle S_G se complique

$$S = S_G [\tilde{g}_{\mu\nu}, \Phi] + S_M [\tilde{g}_{\mu\nu}, \Psi_M]$$

Violation du Principe d'Équivalence Fort et la Cosmologie Induite

Théories Tenseur-scalaire de la gravitation

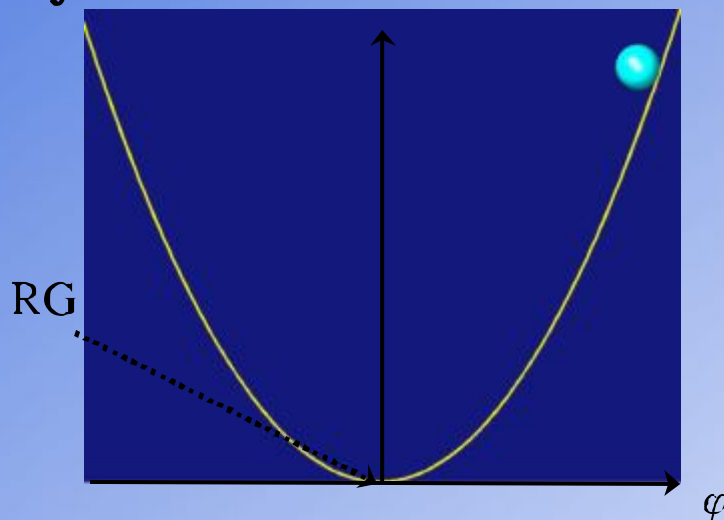
- Représentation en terme d'une nouvelle métrique: Einstein « Frame » $\tilde{g}_{\mu\nu} = A_M^2(\varphi)g^*_{\mu\nu}$

$$S = S_G [g^*_{\mu\nu}] + S_M [\psi_M, A^2(\varphi)g^*_{\mu\nu}]$$

Dans cette **représentation**, on sépare les 2 degrés de liberté de la gravitation:
spin 2 (graviton) et spin 0 (scalaire): RG cas limite

2 « Représentation », le « Dicke-Jordan Frame » dans lequel sont calculés les quantités observables, et l' « Einstein Frame » adapté aux développements mathématiques. En RG ils se confondent, maintenant ils se distinguent

$$V(\varphi) = \int \alpha_M(\varphi) d\varphi$$



Les théories scalaire-tenseur de la gravité converge naturellement vers la RG.

Le cadre théorique est posée mais tel quel il échoue à expliquer de façon satisfaisante l'accélération récente de notre univers.

Violation/Relaxation du Principe d'Équivalence Faible: Introduction d'une composante anormalement pesante ?

Le contenu énergétique de l'Univers est divisé en 3 parties:

- Un secteur gravitationnel décrit par un pure spin 2 (graviton) et un spin 0 (dilaton) degré de liberté et un secteur matériel contenant :
- La matière normalement pesante (matière ordinaire, baryons, photons, ... ?), qui satisfait le principe d'équivalence faible (nécessité expérimentale 10^{-12}) $\boxed{\tilde{g}_{\mu\nu} = A_M^2(\varphi)g_{\mu\nu}}$

- Un secteur AWE* (encore bien mystérieux) qui viole le principe d'équivalence faible (Théorie des cordes ?!)

$$\boxed{S = S_G[g^*_{\mu\nu}] + S_M[\psi_M, A_M^2(\varphi)g^*_{\mu\nu}] + S_{AWE}[\psi_{AWE}, A_{AWE}^2(\varphi)g^*_{\mu\nu}]}$$

$$\boxed{A_M(\varphi) \neq A_{AWE}(\varphi)}$$

Violation/Relaxation du Principe d'Équivalence Faible: Introduction d'une composante anormalement pesante ?

Einstein Frame

$$S = S_G [g^*_{\mu\nu}] + S_M [\psi_M, A_M^2(\varphi) g^*_{\mu\nu}] + S_{\Lambda WE} [\psi_{\Lambda WE}, A_{\Lambda WE}^2(\varphi) g^*_{\mu\nu}]$$

FLRW

$$H_*^2 = \left(\frac{\dot{a}_*}{a_*} \right)^2 = \frac{\dot{\varphi}^2}{3} + \frac{8\pi G_*}{3} (\rho_{*M} + \rho_{*\Lambda WE}), \quad \frac{\ddot{a}_*}{a_*} = -\frac{2}{3} \dot{\varphi}^2 - \frac{8\pi G_*}{6} (\rho_{*M} + 3p_{*M} + \rho_{*\Lambda WE} + 3p_{*\Lambda WE})$$

$$\ddot{\varphi} + 3 \frac{\dot{a}_*}{a_*} \dot{\varphi} + 4\pi G_* \alpha_M(\varphi) (\rho_{*M} - 3p_{*M}) + 4\pi G_* \alpha_{\Lambda WE}(\varphi) (\rho_{*\Lambda WE} - 3p_{*\Lambda WE}) = 0$$

Considérons que le secteur AWE est un fluide à pression négligeable et plaçons nous durant l'ère dominé par la matière

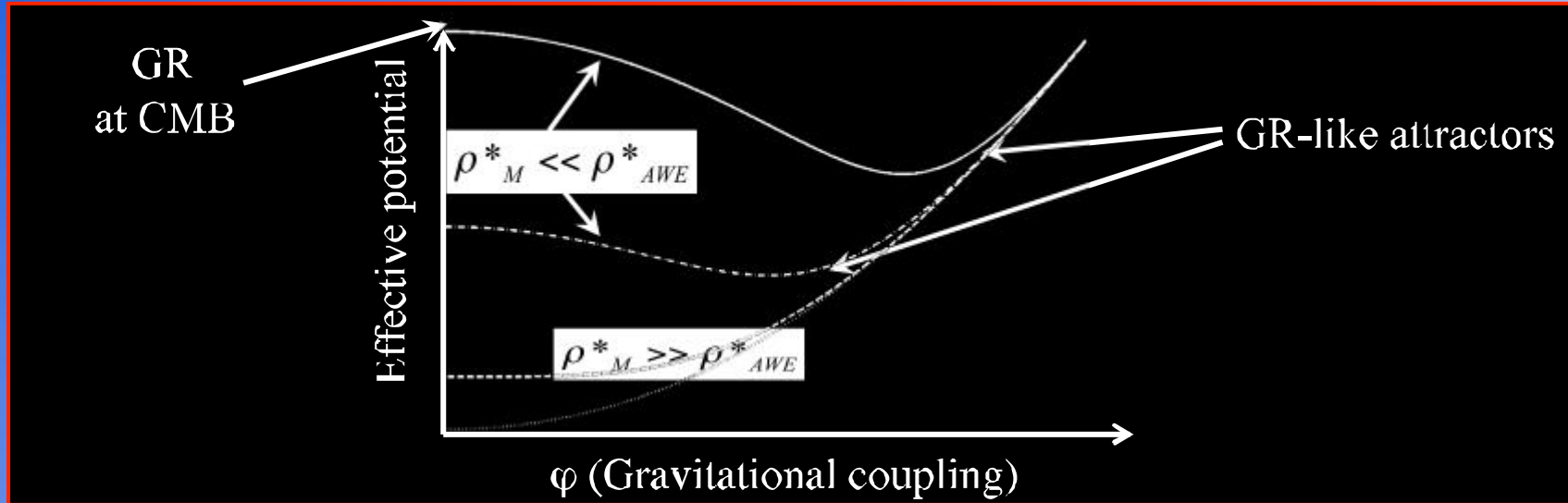
Le système précédent à 2 fluides peut se réécrire comme un système à 1 fluide !

$$\rho_{*T} = \rho_{*M} + \rho_{*\Lambda WE}, \quad A(\varphi) = A_M(\varphi) + A_{\Lambda WE}(\varphi)$$

On déduit alors

$$\frac{2}{3 - \varphi'^2} \varphi'' + \varphi' + \mathcal{N}(\varphi) = 0, \quad \varphi' \equiv \frac{d}{d \log a_*}, \quad \mathcal{N}(\varphi) = \frac{d(\text{Log}(A(\varphi)))}{d\varphi} = \alpha_M(\varphi) + \frac{\alpha_{\Lambda WE}(\varphi) - \alpha_M(\varphi)}{1 + \frac{\rho_M(\varphi)}{\rho_{\Lambda WE}(\varphi)}}$$

Violation/Relaxation du Principe d'Équivalence Faible: Introduction d'une composante anormalement pesante ?



- **Relaxation du principe d'équivalence faible sur les échelles cosmologiques où $\rho_M / \rho_{AWE} \ll 1$**
- **PEf est satisfait par le secteur « normalement pesant » tant que $\rho_M / \rho_{AWE} \gg 1$**
- **1 espace-temps mais 2 constantes de couplages (violation « minimal » du Pef), soit 2 constantes de la gravitation.**

Violation/Relaxation du Principe d'Équivalence Faible: Introduction d'une composante anormalement pesante ?

- **De nouvelles questions se posent.**

L'accélération récente de l'univers est-elle possible ?

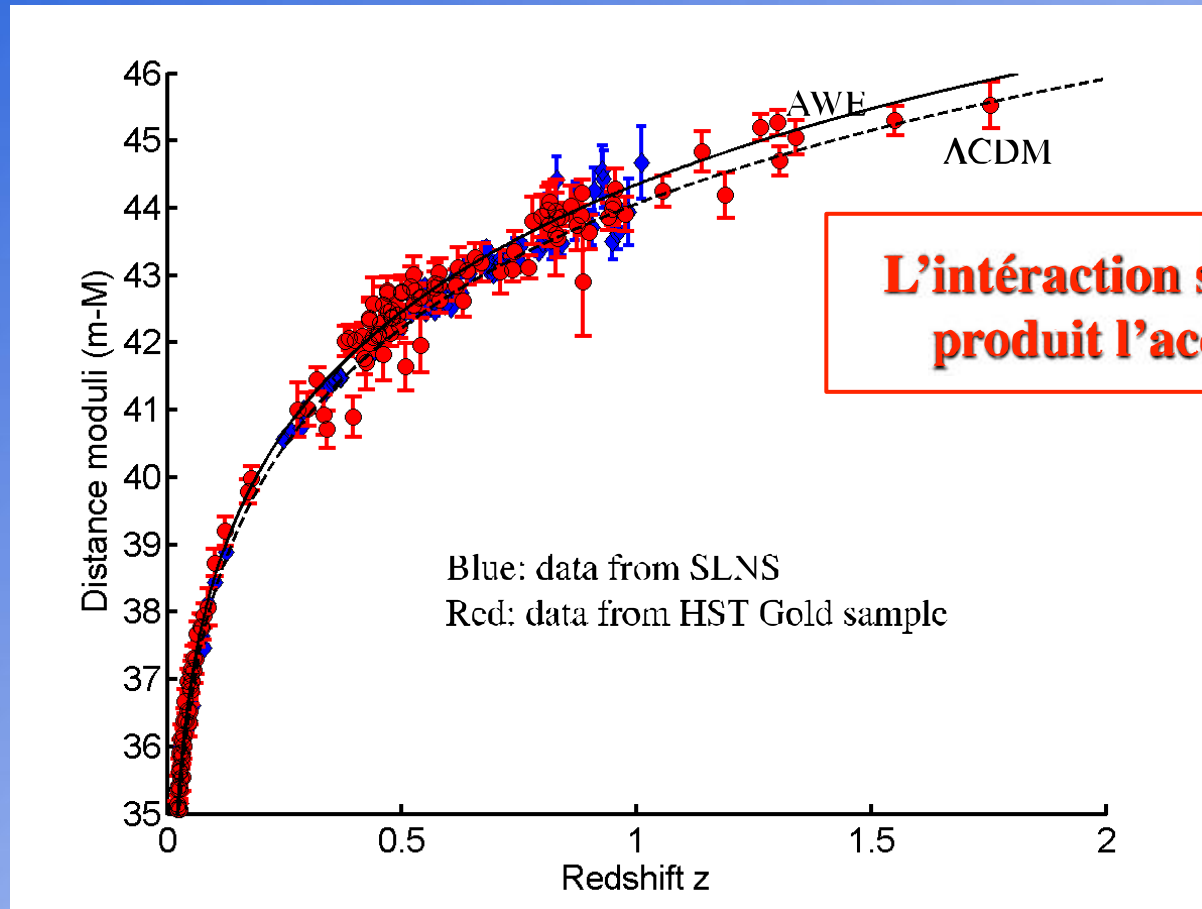
Quelle est cette matière normalement pesante ?

Mais surtout, quelle est cette matière anormalement pesante ?

C'est la confrontation aux observations qui nous répond .

Relaxation du PE Faible aux échelles cosmologiques.

- Diagramme de Hubble des supernovae de type Ia
 - $\Omega_M^0=0.04$, $\Omega_{AWE}^0=0.26$, $t_0(\text{Gyr})=15,9$, $\chi^2/\text{dof}=1.03$



L'interaction scalaire Matière-AWE produit l'accélération cosmique

Matière \equiv *Baryon*
AWE \equiv *DM*
 \Rightarrow
G_M(φ) \equiv *DE*

Pourquoi l'expansion cosmique est-elle accélérée selon l'hypothèse AWE?

Observable frame:

$$\tilde{g}_{\mu\nu} = A_M^2(\varphi) g_{\mu\nu} \quad \tilde{a}(\tilde{t}) = A_m(\varphi) a(t), \quad \tilde{H}(\tilde{t}) = \frac{1}{\tilde{a}} \frac{d\tilde{a}}{d\tilde{t}}, \quad \tilde{q}(\tilde{t}) = \frac{\ddot{\tilde{a}}\tilde{a}}{\dot{\tilde{a}}^2}$$

Facteur d'accélération:

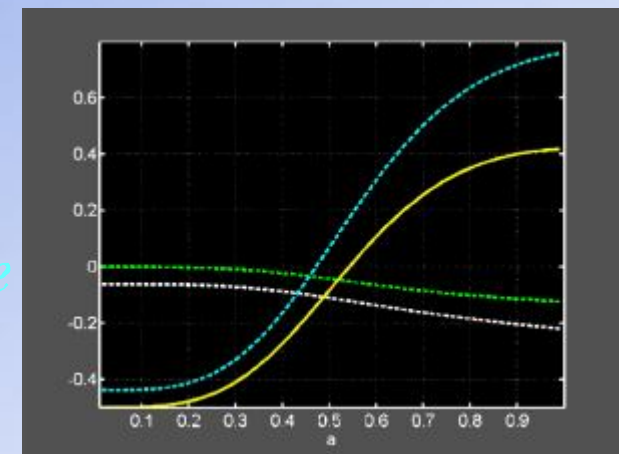
$$\frac{1}{\tilde{a}} \frac{d^2\tilde{a}}{d\tilde{t}^2} = \tilde{H}^2 \frac{\varphi'^2 \left(3 \frac{d\alpha_M}{d\varphi} - 2 \right) - 6\alpha_M \varphi'}{3(1 + \alpha_M \varphi')^2} - \frac{4\pi G A_m^2(\varphi)}{3} (1 + 3\alpha_M^2) \tilde{\rho}_m$$



$$- \frac{4\pi G A_m^2(\varphi)}{3} (1 + 3\alpha_M \alpha_{AWE}) \tilde{\rho}_{AWE}$$



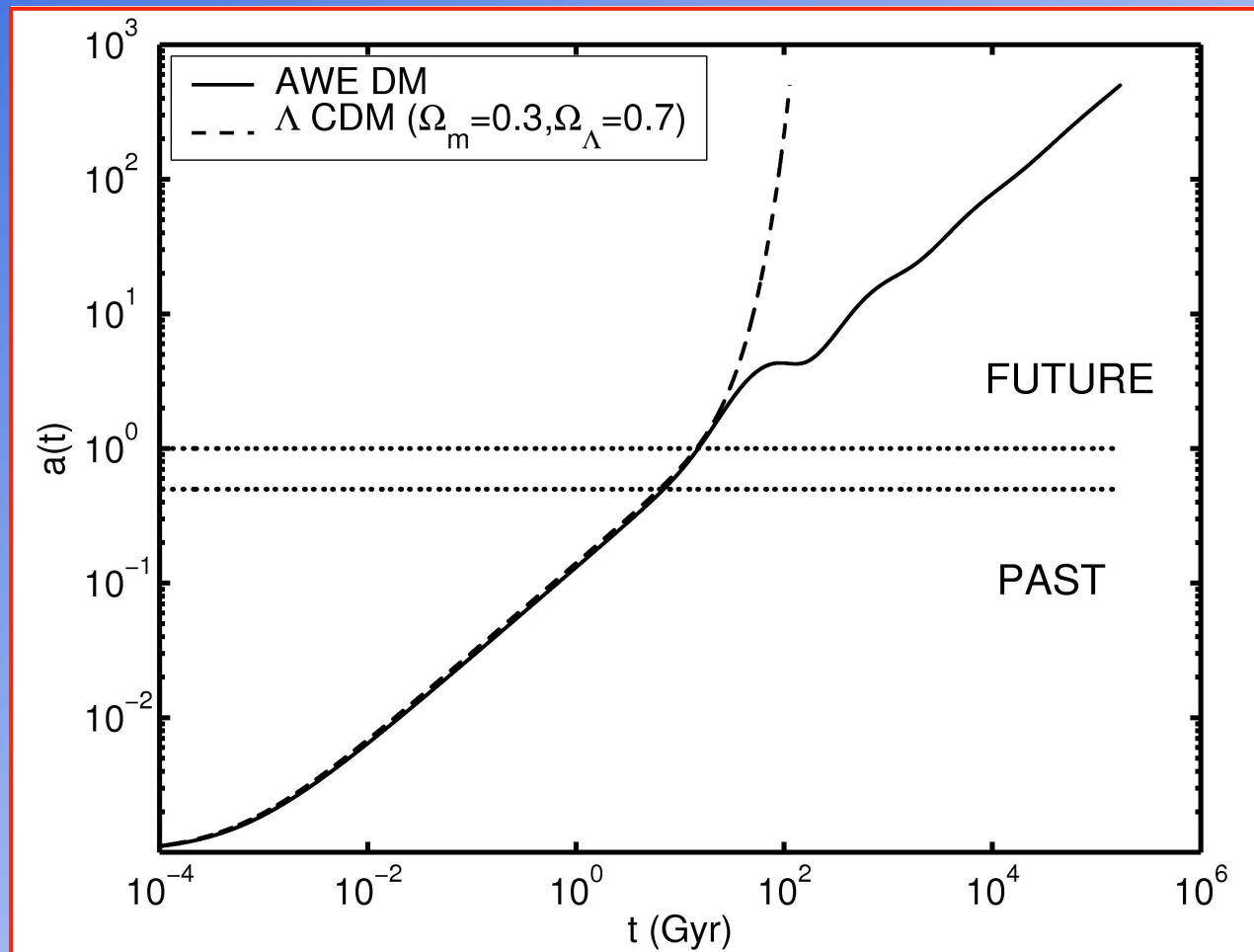
L'interaction scalaire entre la matière et AWE qui produit l'accélération.



Best fit on SNIa data set
 $(\chi^2/\text{dof}(AWE)=1.06, \chi^2/\text{dof}(\Lambda\text{CDM})=1.05)$

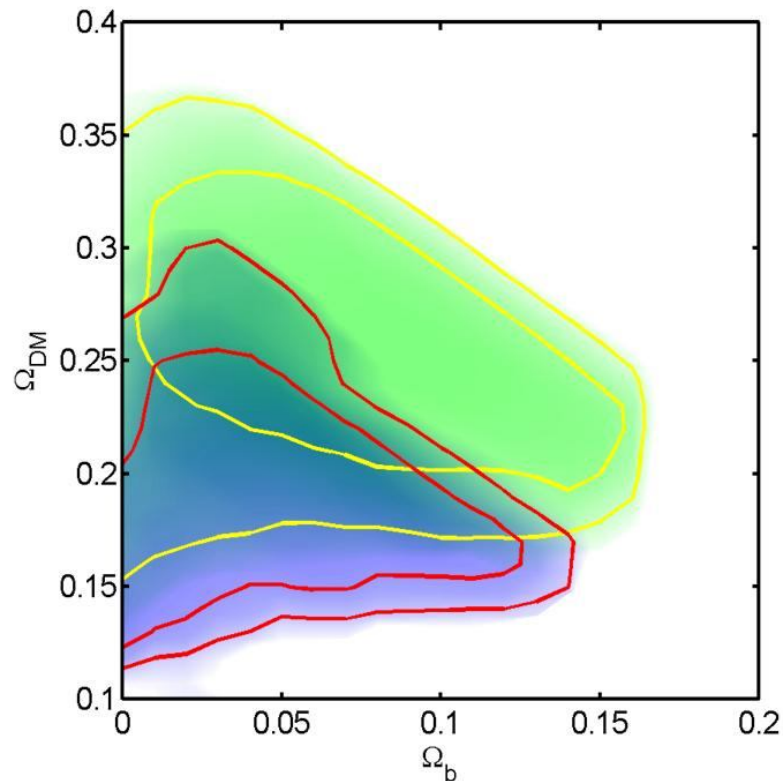
Relaxation du PE Faible aux échelles cosmologiques: Description unifiée de la MN et de l'EN, Quid du modèle de concordance ?

- Diagramme de Hubble des supernovae de type Ia
 - $\Omega_M^0=0.04, \Omega_{AWE}^0=0.26, t_0(\text{Gyr})=15,9, \chi^2/\text{dof}=1.03$



Relaxation du PE Faible aux échelles cosmologiques: Hypothèse AWE: Vers une description unifié de la MN et de l'EN.

- **Contraintes de l'analyse des SNe Ia. (HST (*) + SNLS data (*))**



Matière ordinaire = Baryon
AWE = DM
 \Rightarrow
 $G_M(\varphi) = DE$

- **La densité de baryons et de DM est déduite uniquement des SN Ia!**
- **Prédictions sur Ω_B et Ω_{DM} en accord avec les analyses indépendantes (CMB, BBN...)!**

Relaxation du Principe d'Équivalence Faible aux échelles cosmologiques.

L'Hypothèse AWE – Une description unifié de la MN et de l'EN

**L'Énergie Noire serait un effet induit
de la gravité « anormale »
de la Matière Noire.**

Test du principe d'équivalence aux échelles cosmologiques ?

*Réussir à faire tomber d'une tour de Pise cosmologique,
une boule de matière ordinaire et une boule de matière noire.*

Cela est-il possible ? OUI !

Les Moyens de Conclure ?

- **De nombreux modèles théoriques de l'énergie noires sont envisageables. Ils questionnent tous les principes fondamentaux de notre paradigme cosmologique.**
- **Ils rendent cependant comptent avec précision des signatures observationnelles de l'existence de l'énergie noire.**
- **Ces signatures concernent "principalement" l'évolution dynamique globale de notre Univers.**
- **Nécessité de concevoir des signatures discriminantes entre ces modèles**
- **Elles concerneront les moyens de rendre compte de la structuration de l'Univers**
- **Empreintes de l'énergie noire sur la formation des structures cosmiques.**

Modèles d'énergie noire considérés

- Cosmological constant Λ CDM: $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_m - 2\rho_\Lambda)$

- Quintessence scenari:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_m + \rho_Q + 3p_Q) \quad \ddot{a} > 0 \text{ if } p_Q < -\frac{\rho_Q + \rho_m}{3}$$

$$\rho_Q = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + V(\varphi) \quad p_Q = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} - V(\varphi) \quad \ddot{\varphi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\varphi} + \frac{dV}{d\varphi} = 0$$

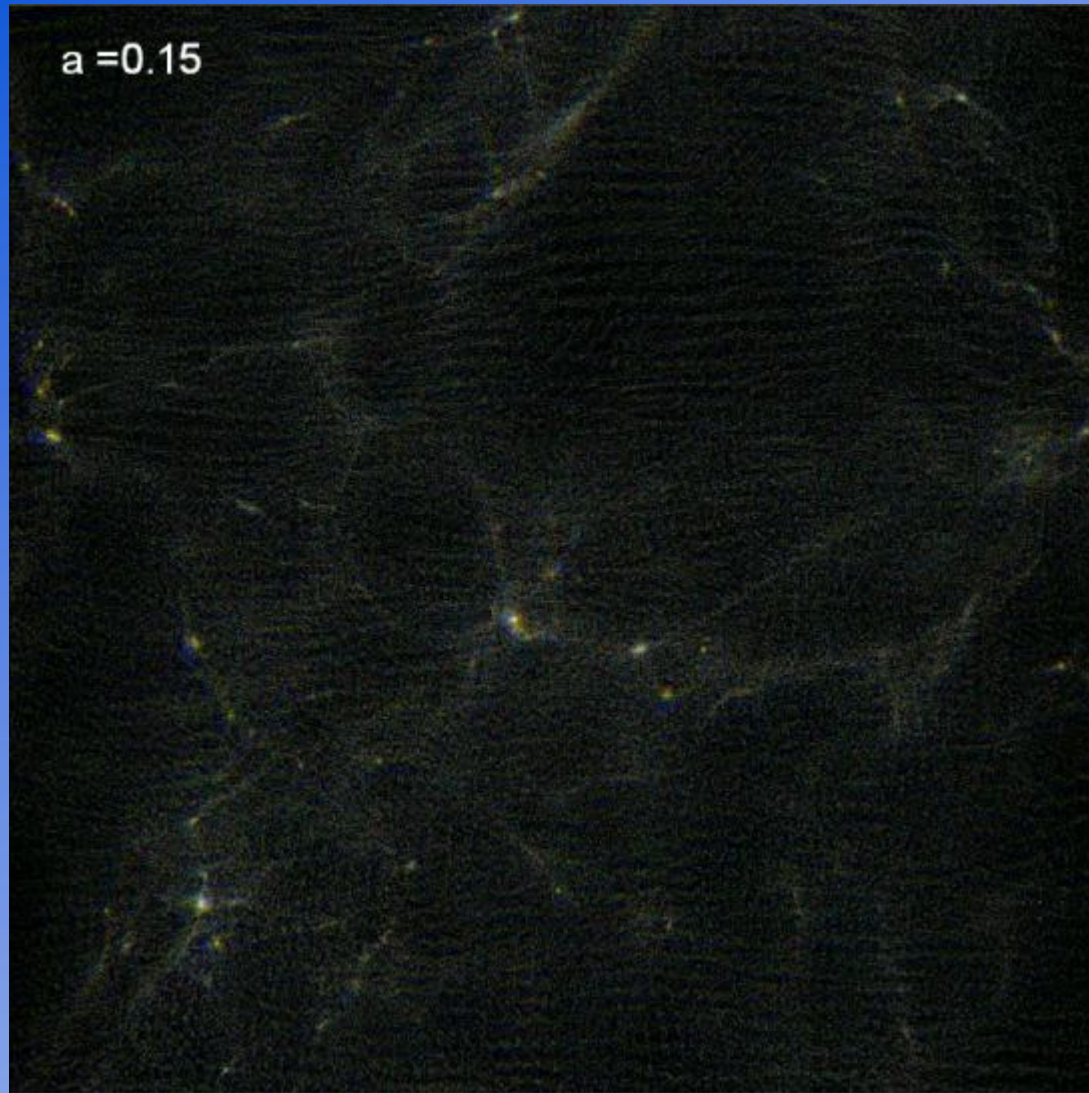
- Ratra-Peebles (1998) potential (SUSY breaking, backreactions, ...) **RPCDM**

$$V(\varphi) = \frac{\lambda^{4+\alpha}}{\varphi^\alpha}$$

- SUGRA potential (Brax & Martin 2000) (radiative correction of RPCDM at $E \sim m_{\text{pl}}$) **SUCDM**

$$V(\varphi) = \left(\frac{\lambda^{4+\alpha}}{\varphi^\alpha} \right) \exp(4\pi G \varphi^2)$$

Empreintes de l'énergie noire sur un large domaine d'échelles, de la taille de l'univers observable à l'échelle sub-galactique.



*Simulation Numérique
« Grand Challenge »*

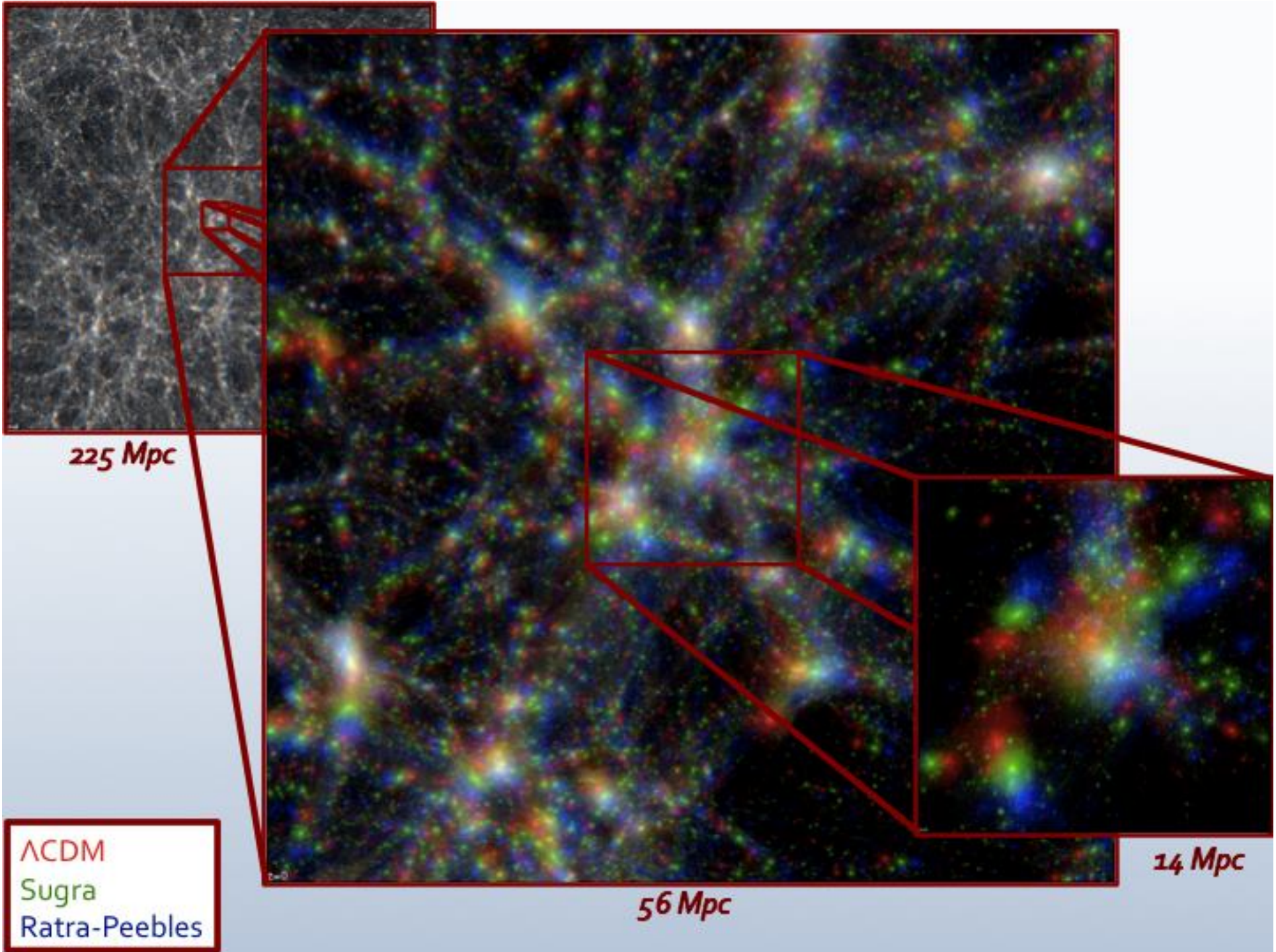
*Il y a environ 10 milliards d'années
à aujourd'hui*

*Du milliard d'années lumière
à quelques millions
d'années lumière soit
une fraction de l'univers observable
à l'échelle
des amas de galaxies.*

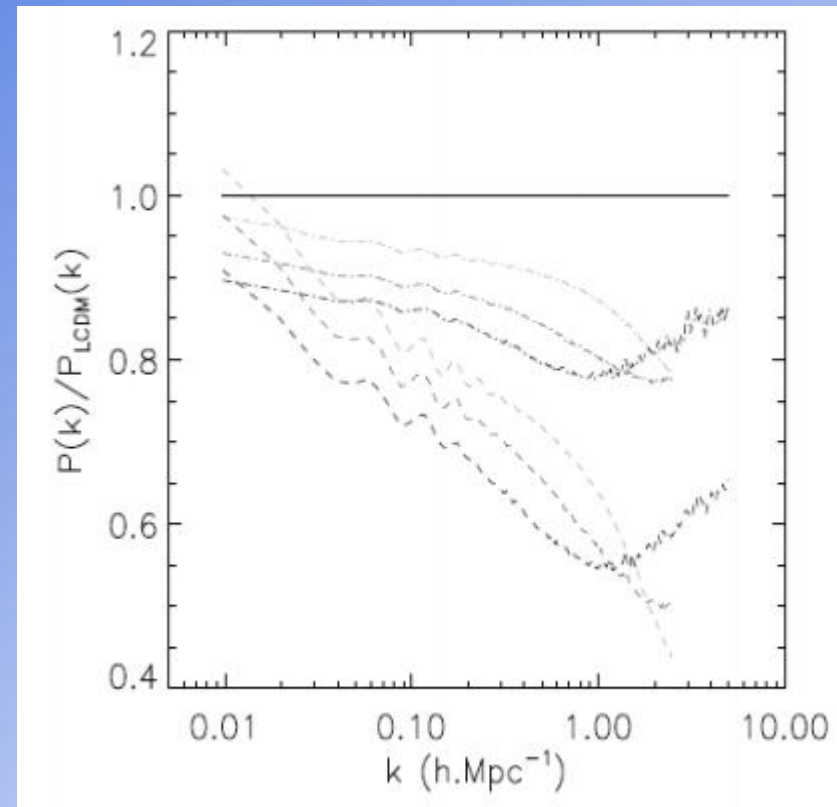
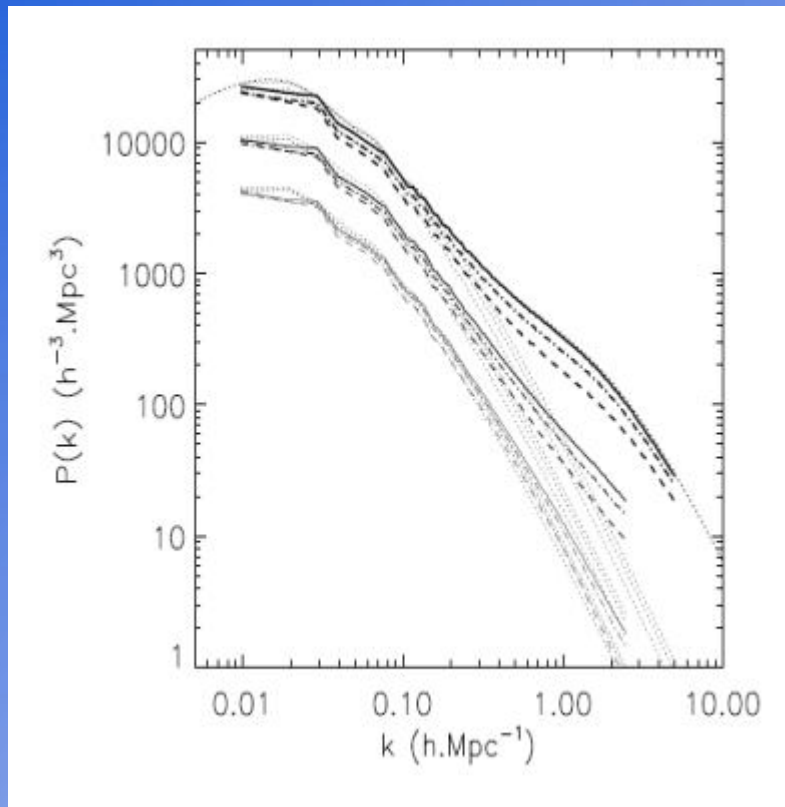
Les Moyens de Conclure ?

Probablement !

***ΛCDM** / **QUINTESSENCE (RP)** /
SUPERGRAVITE*



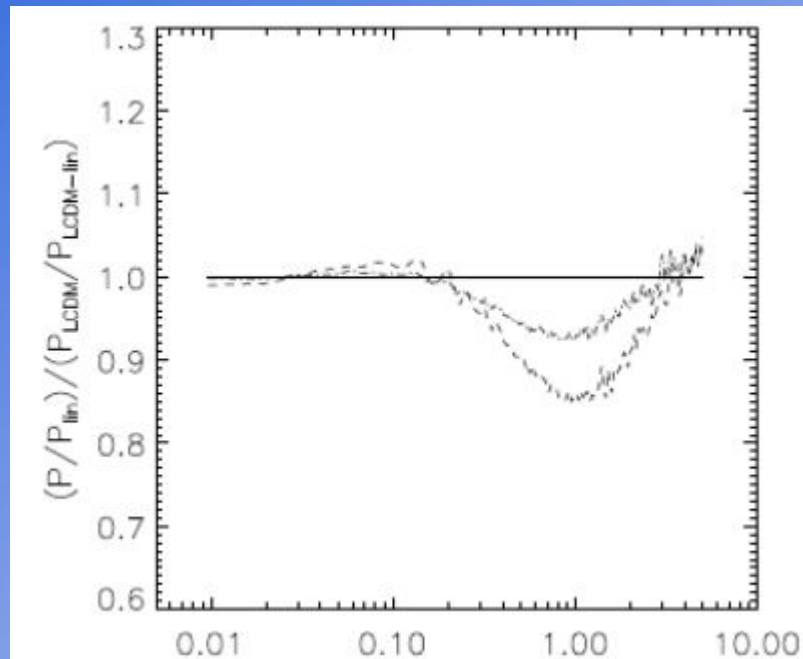
Le Spectre de Puissance Non-linéaire



On observe des différences importantes dépendantes du temps et de l'échelle suivant les modèles d'énergie noire.

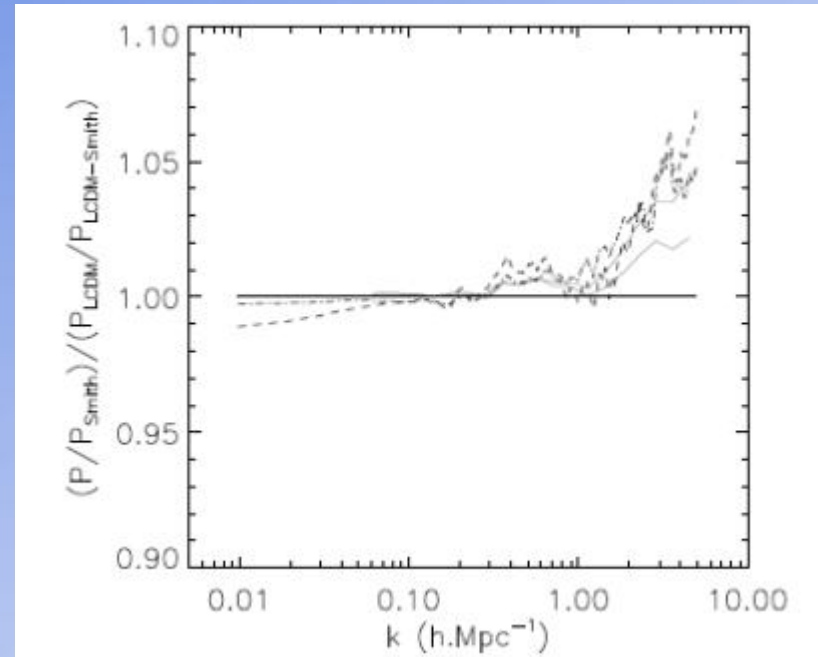
Signature de l'énergie noire sur les échelles non-linéaires

On « soustrait » les différences initiales et linéaires



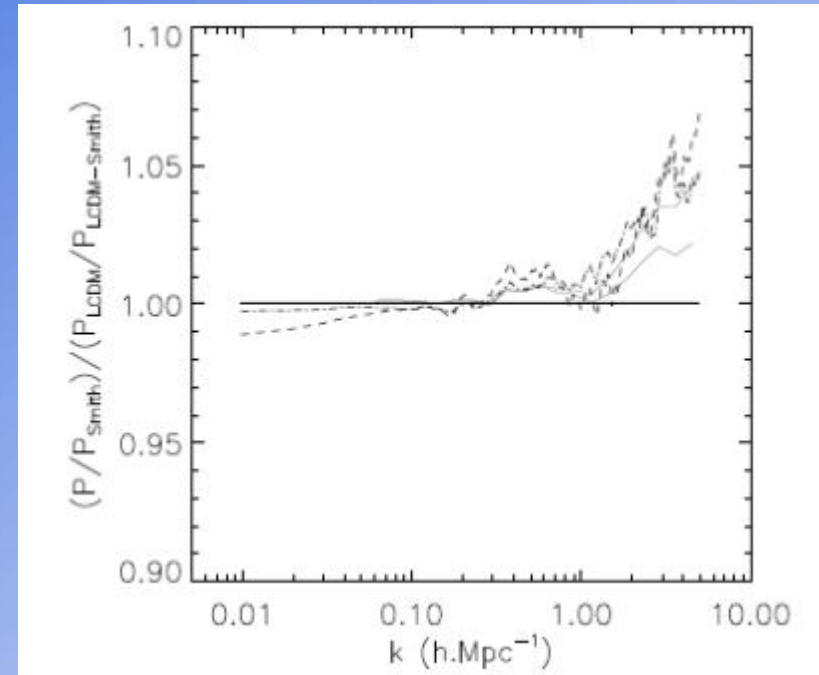
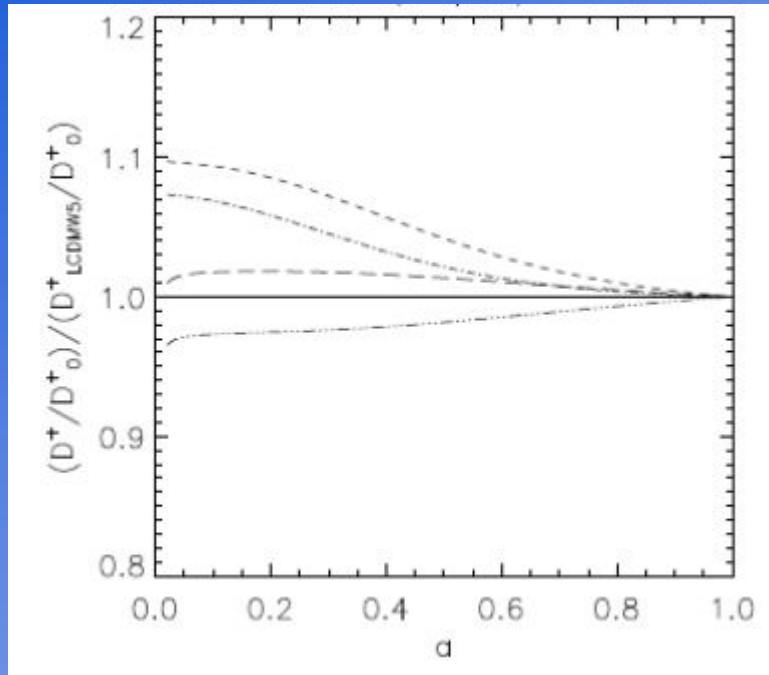
Les différences subsistent

Normaliser à la prédiction de Smith et al 2003



La dynamique non-linéaire est spécifique à chaque modèle

Signature de l'énergie noire sur les échelles non-linéaires



L'empreinte de l'énergie noire est corrélée au taux de croissance linéaire.

L'empreinte de l'énergie noire est le résultat d'une histoire différente de la structuration.

CONCLUSION.

« Vouloir conclure c'est la bêtise »

Gustave Flaubert.

La Cosmologie ...

... La Science du 21^{ème} Siècle,

- *L'énergie noire, ou plus précisément l'origine de l'accélération cosmique récente de notre Univers pose directement la question des principes fondamentaux de la cosmologie moderne, de la physique moderne.*
- *Sommes nous à la veille d'une révolution conceptuelle de même ampleur que celle connue au début du vingtième siècle (la théorie de la relativité restreinte et générale et la mécanique quantique).*
- *La solution combine-t-elle plusieurs interprétations ? Ce serait vraiment un mauvais tour.*

« Dieu est subtil mais il n'est point méchant ! »

• Albert Einstein

« Ce n'est pas le monde qui est le lieu de la question, mais la question qui est le lieu du monde »

R. Nahmann de Braslav.