



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Constante cosmologique, ou quintessence?



**Françoise Combes**



# Les grandes lignes

Formulation du problème

Champ scalaire (cosmon ou quintessence)

avec Equation d'état  $P = w \rho$   $w < -1/3$

Exemple de cosmon, couplage avec les neutrinos

Les caméléons

Les Galiléons

Principaux modèles de quintessence, et leurs limites

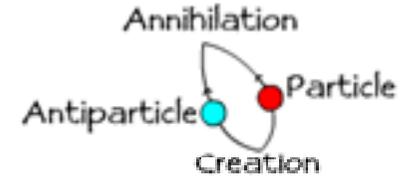
K-essence

Gaz de Chaplygin

Les Tachyons

Conclusion

# Energie du vide

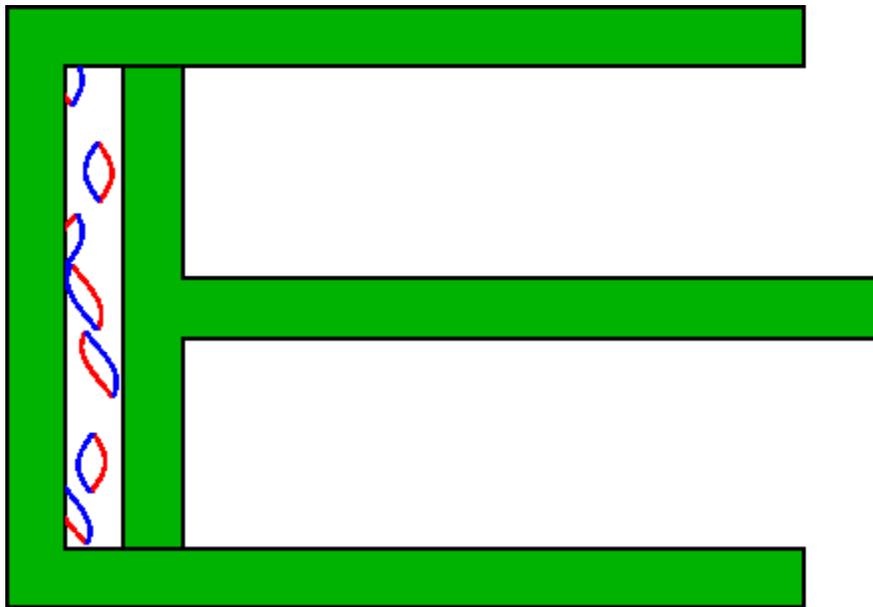


- L'énergie du vide doit être constante, ne dépend de rien
- Il faut fournir de l'énergie pour tirer le piston, car plus d'énergie après
- Si le piston fournit de l'énergie, → pression négative

$$P = -\rho c^2$$

La « gravité » du vide  
est négative

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \frac{\rho + 3P}{c^2} \right)$$



Pour un gaz,  $N \sim 1/V$

$\rho$  diminue

La pression pousse le piston

# Comment expliquer cette valeur

$$\rho_{\text{zero pt}} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \sqrt{k^2 + m^2} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} = \frac{1}{16\pi^2} k_{\text{max}}^4$$

$$\rho_{\text{zero pt}} < \rho_{\text{crit}} \Rightarrow k_{\text{max}} < 0.03 \text{ eV}$$

$\rho_{\text{zero pt}} = 10^{72} \text{ GeV}^4$ , si la coupure est l'échelle de Planck  
=  $2 \cdot 10^9 \text{ GeV}^4$  si la coupure est l'échelle de l'interaction électrofaible  
On observe  $\rho \sim (2 \times 10^{-3} \text{ eV})^4$ , soit  $10^{-47} \text{ GeV}^4$

Problèmes de

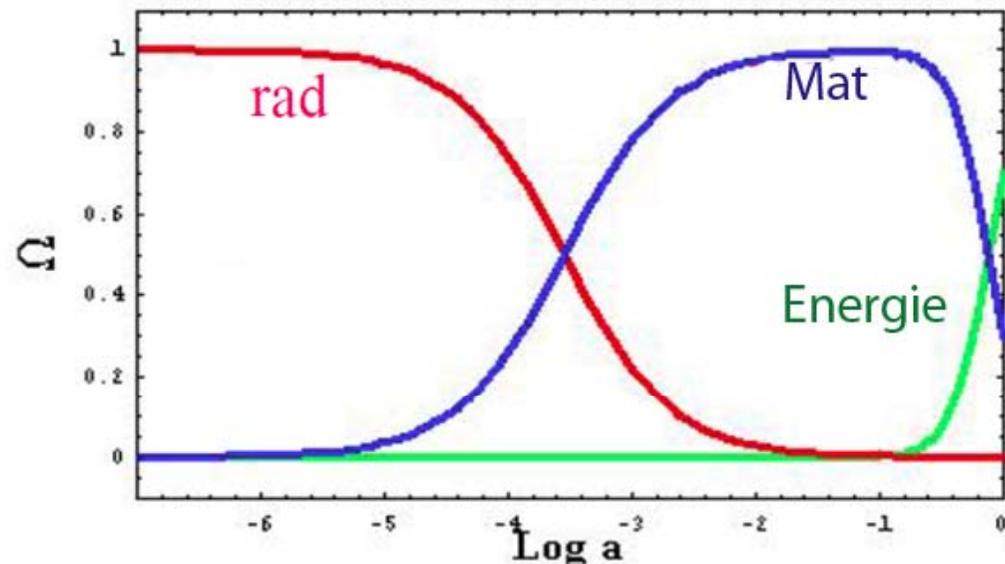
→ Ajustement fin

→ Coïncidence temporelle

On doit expliquer le passage  
Matière dominante

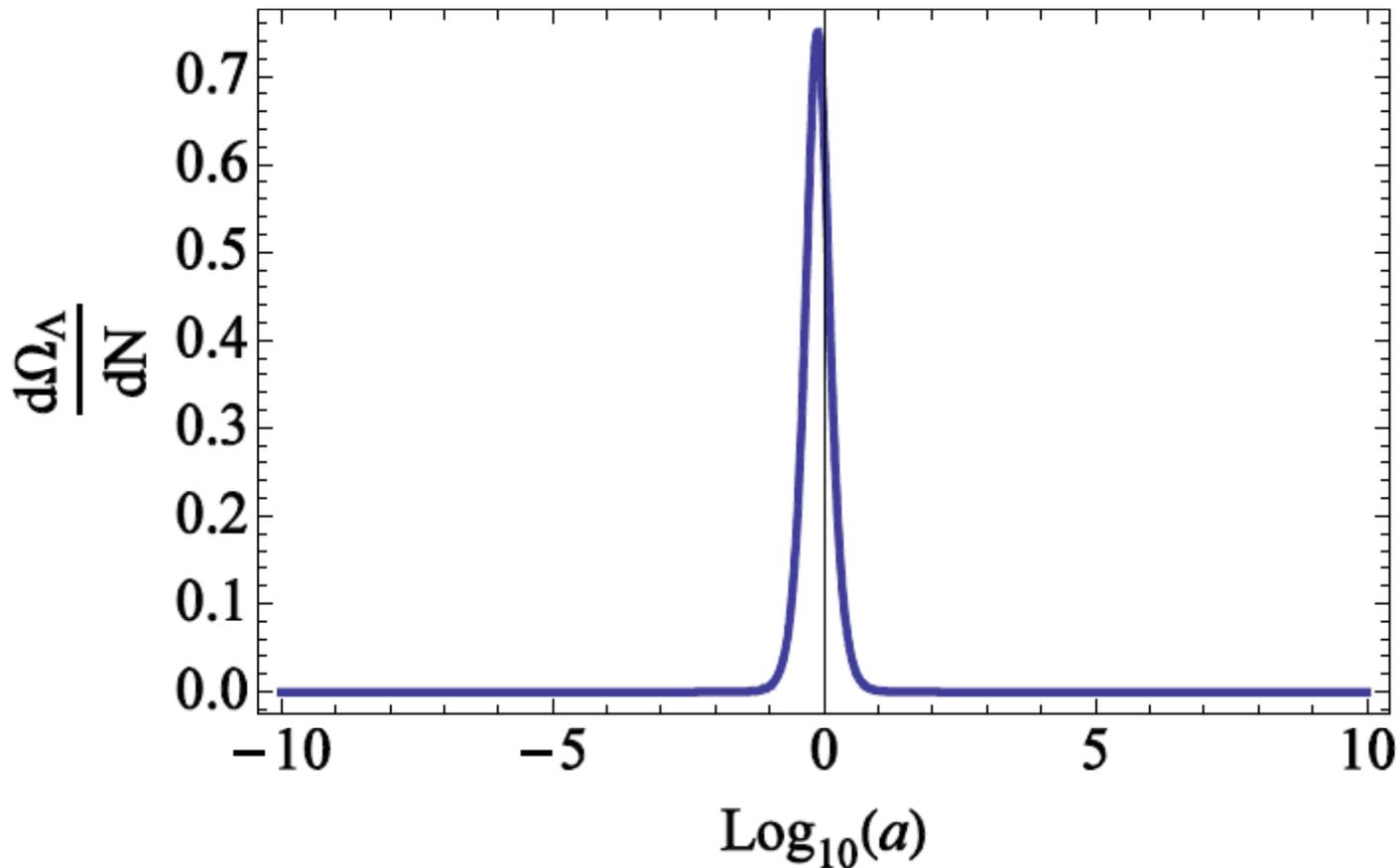
→ Énergie dominante

à  $z=0.5$



# Pourquoi maintenant?

Le problème de la coïncidence est d'autant plus frappant que l'on passe en dérivée:  $\Omega_\Lambda$  est nul dans le passé, croît très récemment, ( $z=0.5$ , 5Gyr) pour devenir 1 dans le futur.



# Deux grandes pistes

Le problème de l'énergie noire peut être résolu de 2 façons,  
Selon que l'on ajoute  $\Lambda g_{\mu\nu}$  à **droite** ou qu'on le soustraye à **gauche**  
de l'équation d'Einstein

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

- Soit en modifiant le terme de droite  $T_{\mu\nu}$ , **la matière**  
Quintessence, K-essence, Tachyons, gaz de Chaplygin, modèles  
couplés, etc. ( $-1 < w < -1/3$ )
- Soit en modifiant le terme de gauche  $G_{\mu\nu}$ , **la gravité/géométrie**  
f(R) modèles de gravité, modèles Tenseur-scalaire, monde des  
branes, gravité massive, inhomogeneities, etc. ( $w < -1$  possible)

Avec parfois des recouvrements entre les deux types de solution

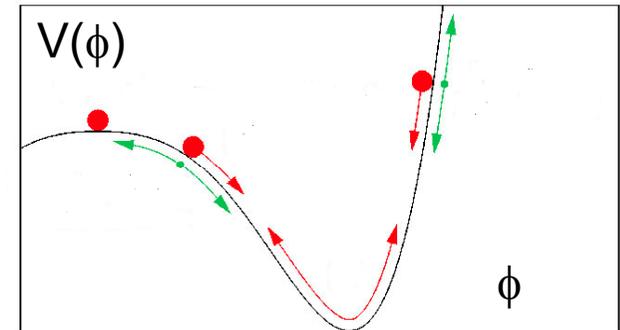
# Les diverses possibilités

Une constante cosmologique, avec  $w = -1$ , standard  $\Lambda$ CDM

Mais on pourrait avoir n'importe quel fluide, ou champ  $\phi$ , avec  $p = w\rho$ , et  $w < -1/3$

Le plus simple est le champ scalaire  $\phi$ , avec potentiel  $V(\phi)$ , pression et énergie données par

$$p = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi), \quad \rho = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)$$



**Le terme cinétique doit être faible,  $\rightarrow \phi$  lentement variable**

L'équation de conservation est  
qui donne l'équation de Klein-Gordon

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

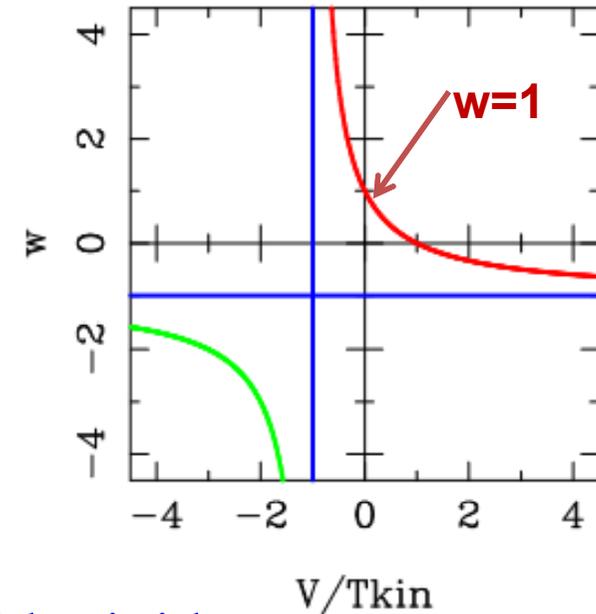
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V' = 0$$

(eq de Schrödinger relativiste)

# Equation d'état

L'équation d'état  $P=w\rho$ , s'écrit

$$w = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$



**Selon les cas extrêmes:**

Energie cinétique domine	$w \rightarrow 1$	fluide rigide
Equipartition	$w \rightarrow 0$	matière froide, baryons
Energie potentielle domine	$w \rightarrow -1$	constante cosmologique
Energie cinétique négative	$w < -1$	fantôme



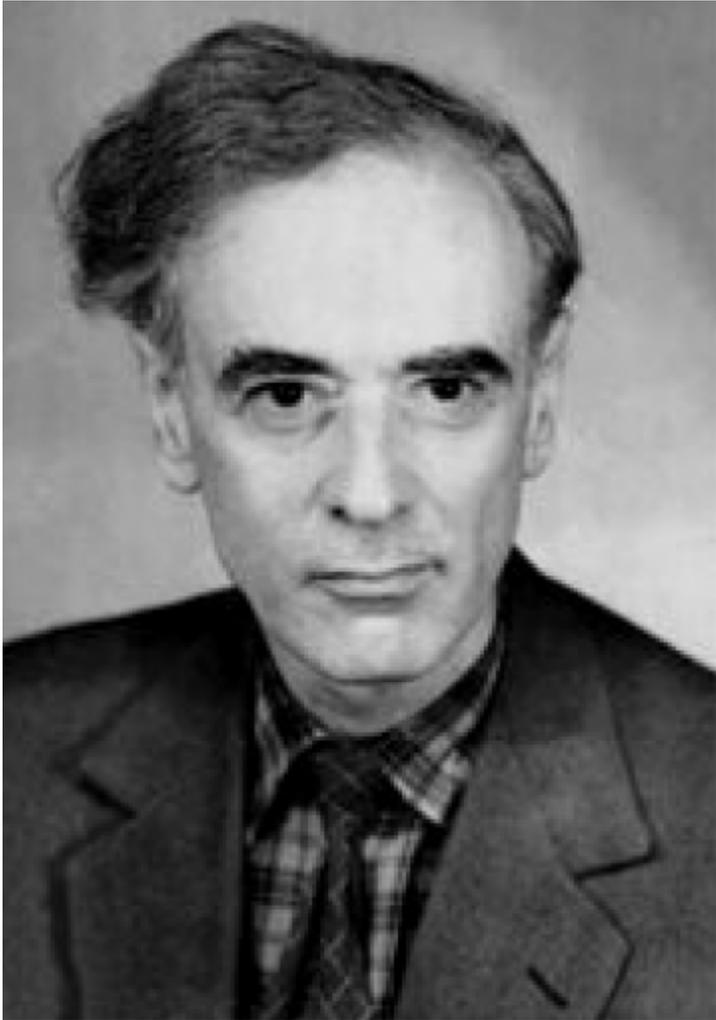
→ L'équation d'état varie dans le temps

→ On peut écrire, à l'approx linéaire ( $a(t)$  est le rayon de l'Univers)

$$w = w_0 + w_1 z$$

$$w = w_0 + w_1 (a-1)$$

# Opinion de Lev Landau sur les cosmologistes



**Souvent dans l'erreur,  
Jamais dans le doute !**

*Procéder par élimination*

Univers statique, ou  $H_0 = 500\text{km/s}$

Cordes cosmiques, Défauts topologiques

Transition de phase, baryogénèse

Monopoles magnétiques

Matière noire chaude

Particules instables

Extra-dimensions, ...

# Dans le doute, ajouter un champ scalaire!

**Physique classique:** un champ scalaire comme un potentiel, une température (gradient comme champ vectoriel, forces)

**Théorie quantique des champs:**

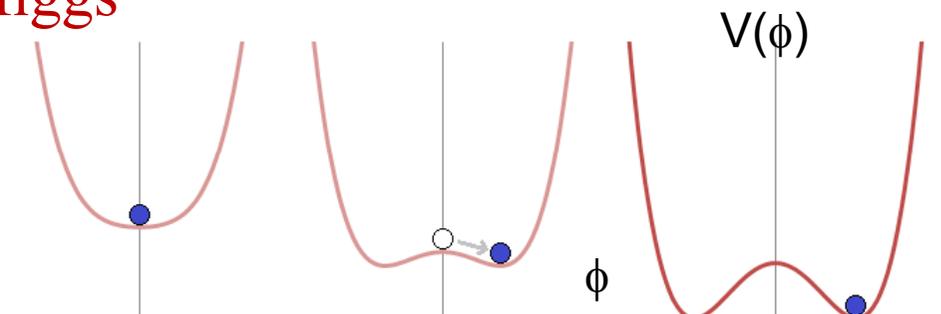
Champ scalaire, de spin 0, le seul dans le modèle standard et le plus célèbre: le champ de Higgs  $\phi$

L'interaction avec le champ donne de la masse aux particules

Le photon n'interagit pas avec le champ de Higgs, et a une masse nulle

La masse de tous les fermions est due à leur interaction avec le champ de Higgs

Le Higgs a une masse par brisure de symétrie

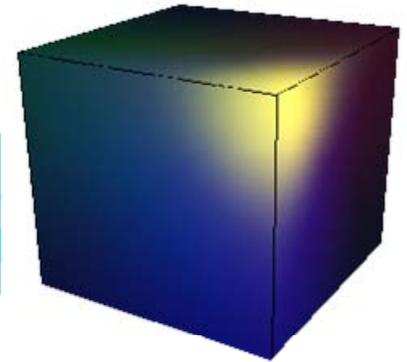


# Caractéristiques du champ scalaire

**Action** du champ scalaire  $S = \int \sqrt{-g} d^4x \left[ \frac{1}{16\pi G} R + L_\phi \right]$

avec le Lagrangien

$$L_\phi = -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \phi_{,\mu} \phi_{,\nu} - V(\phi)$$

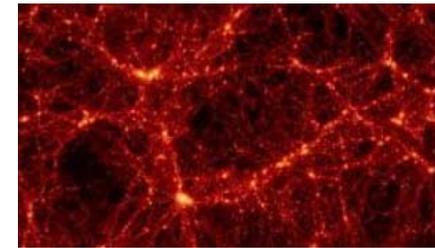


*Energie noire*

Pour un tel champ scalaire, la vitesse de propagation (du son) est

$$c_s = \delta p / \delta \rho = \text{vitesse de la lumière } c$$

Le fluide oscille, et ne s'effondre pas,  
sa propre pression résiste à la gravité



*Matière*

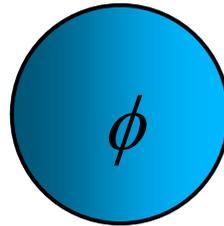
Perturbations  $\phi$  de l'équation de Klein Gordon dans l'espace de Fourier  
A petite échelle (grand  $k = 2\pi/\lambda$ ), le terme  $k^2$  domine

$$\ddot{\phi} + 2H\dot{\phi} + c_s^2 k^2 \phi + a^2 U'' \phi = 0$$

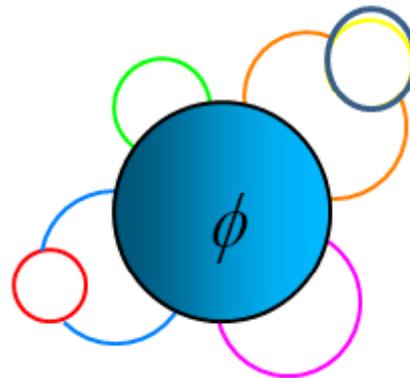
**La perturbation oscille autour de zéro, comme une onde acoustique**

# Masse du "cosmon" ou quintessence

L'excitation du champ de quintessence est une particule de quintessence, ou cosmon

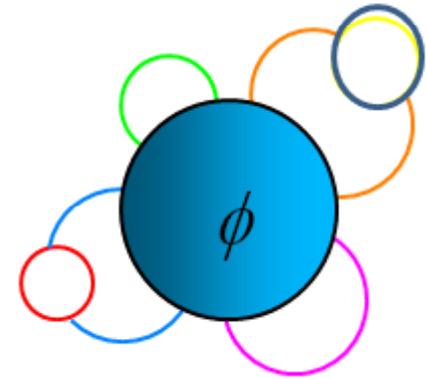


En théorie quantique des champs, on ne voit jamais la particule "seule"  
On voit l'effet collectif de la somme des interactions avec des particules ou champs virtuels



# Ajustement fin de la masse

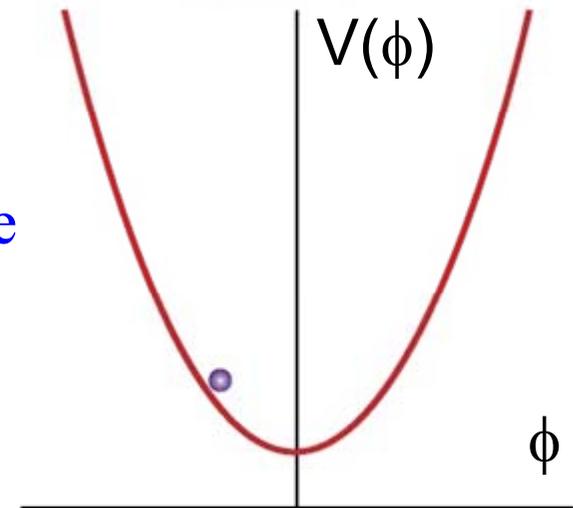
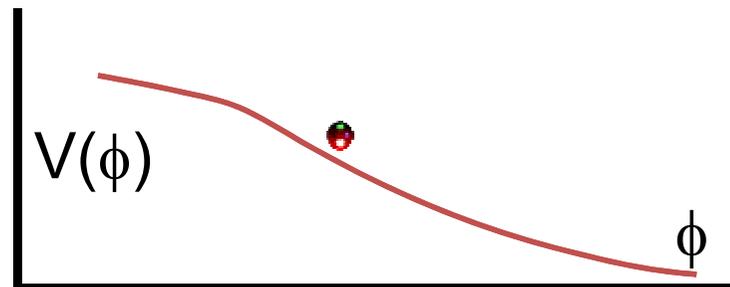
L'effet de ces particules virtuelles est  
d'augmenter la masse  
A moins qu'il existe une symétrie pour la  
diminuer  
C'est le cas des particules stables connues



Sauf le Higgs, qui justement est très massif  
(symétrie brisée)  
Un champ massif descend très vite son potentiel

Pour la quintessence, il faut une masse très faible  
 $m\phi \sim 10^{-33} \text{eV} \sim 10^{-60} M_{\text{Pl}}$

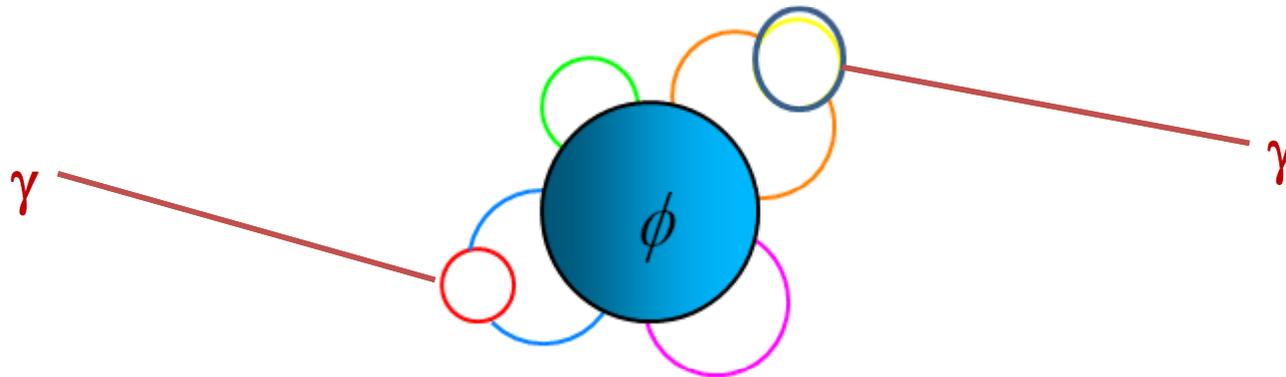
→ Pente douce



# Problème des interactions

D'autre part le champ devrait interagir avec les autres particules/champs

Il est difficile de garder un nouveau champ complètement isolé



Si le champ interagit avec l'une d'entre elles

→ Interagit avec toutes

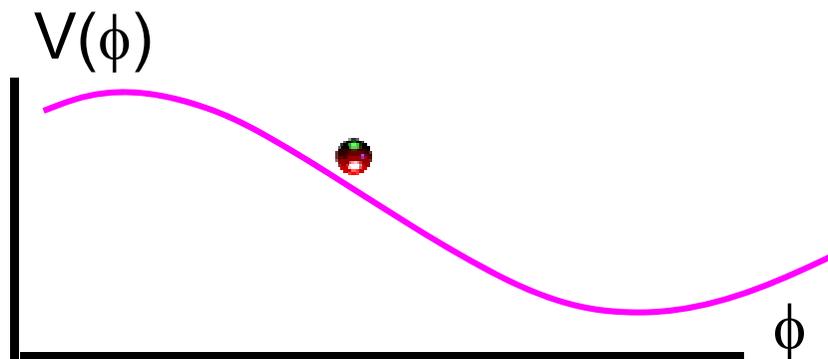
Notamment les particules du modèles standard

→ Contraintes sur la 5<sup>ème</sup> force, et variation des constantes

# Solution: symétrie brisée

Ces deux ajustements fins, sur les faibles masses et interactions peuvent être résolus par une symétrie légèrement brisée

$$\phi \rightarrow \phi + \phi_0$$



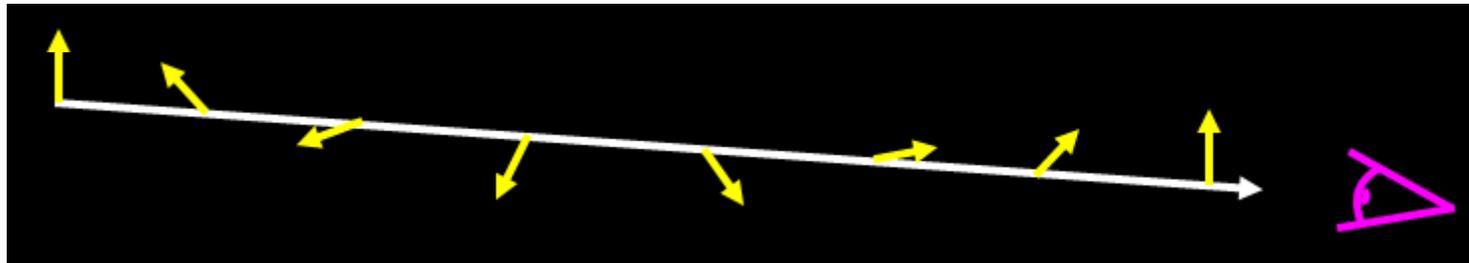
La quintessence serait un pseudo-boson de Nambu-Goldstone, avec un potentiel sinusoidal et par nature une faible masse et de faibles interactions

(le boson de Nambu-Goldstone a masse=0 spin=0, matière condensée, fluides, phonons)

# Contraintes observationnelles

Interaction couplant la quintessence aux champs électromagnétiques

Cette interaction produit une **biréfringence cosmologique**:  
Les vecteurs polarisation des champs E, B devraient tourner  
lors de leur voyage à travers le champ de quintessence  
Rotation indépendante de la fréquence



Contraintes du CMB

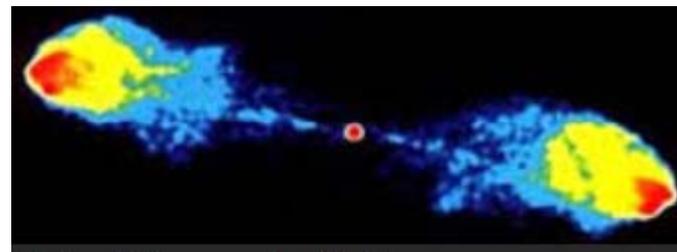
WMAP, Planck rotation  $< 2^\circ$

Les radio-galaxies et GRB

→ contraintes intéressantes

*Galaverni et al 2016*

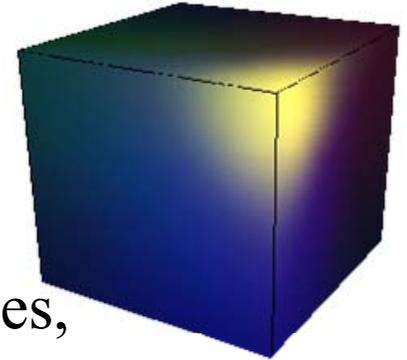
*Radio-galaxy*



*GRB*



# Problème de la masse



*Energie noire*

- Supposons que tous les paramètres de masse soient proportionnels au champ scalaire  $\phi$  (champs quantiques, supercordes, unification...)
  - $M_p \sim \phi$ ,  $m_{\text{proton}} \sim \phi$ ,  $\Lambda_{\text{QCD}} \sim \phi$ ,  $M_W \sim \phi$ , ...
  - $\phi$  peut évoluer avec le temps: **cosmon (t)**
  - $m_p/M$  : presque constant: contraintes des **observations à  $10^{-7}$  !**
  - **Seuls les rapports de masse sont observables**
  
  - $\phi$  peut correspondre à la transition N-Dim vers 4D univers actuel
  - Ou bien à l'anomalie quantique de dilatation (non-indépendance d'échelle)  $E > 0 \rightarrow$  quintessence
- $\rightarrow$  Prenons un exemple de quintessence**

# Cosmon et neutrinos: $\phi + \nu$



Comme la transition rayonnement-matière à  $z=4000$  (équivalence) survient car  $\rho_{\text{rad}} \propto a^{-4}$ , et  $\rho_{\text{m}} \propto a^{-3}$ , on peut penser à une autre transition, avec un fluide dont la masse varie dans le temps  $m(a) \propto a^{3\varepsilon}$

Telle que sa densité  $\rho_{\text{g}} \propto a^{-3(1-\varepsilon)}$ , choisie pour que la transition soit  $z=0.5$   
Cela pourrait être les neutrinos (*Amendola, Baldi, Wetterich 2008-13*)

Dans ce modèle, la quintessence du champ scalaire « cosmon »  $\phi$ , est couplée aux neutrinos, et ce couplage fait varier la masse  $m_{\nu}$   
**A la transition, le champ  $\phi$  tend vers une constante → accélération**

Le champ sera de nature « tracker », i.e. quelles que soient les conditions initiales, l'évolution sera vers un « attracteur »

(comme dans les systèmes dynamiques, dont l'évolution est irréversible,  
*Cf Théorie du chaos*)

# Evolution temporelle

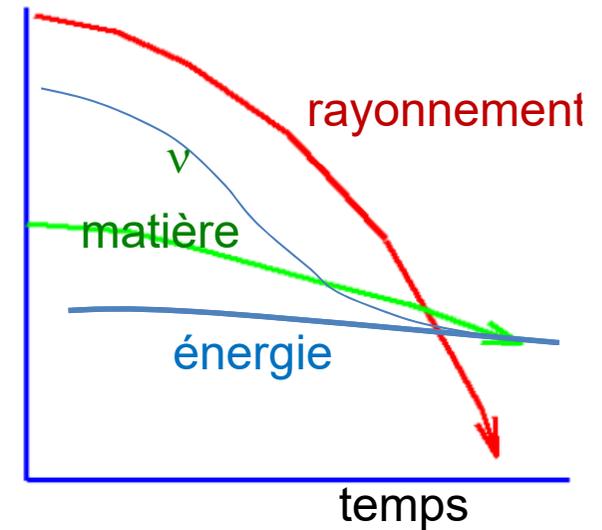
Rayonnement domine  $a(t)$  varie comme  $t^{1/2}$

Après l'équivalence,  $a(t)$  varie comme  $t^{2/3}$

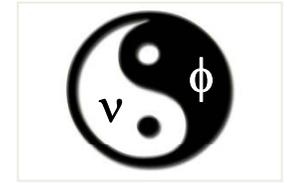
- $\rho_m \sim a^{-3} \propto t^{-2}$  univers dominé par la matière  
 $\propto t^{-3/2}$  ère du rayonnement
- $\rho_{\text{rad}} \sim a^{-4} \propto t^{-2}$  univers dominé par le rayonnement

Le très grand rapport matière/radiation aujourd'hui est dû  
au grand âge de l'Univers

Même explication pour l'énergie noire?



# Neutrinos couplés au cosmon



Dans le cas où  $\varepsilon$  est grand ( $\sim 4$ ), les neutrinos seraient massifs aujourd'hui, mais de masse négligeable au moment de la formation des structures  $\rightarrow$  n'empêchent pas la formation des galaxies

Le couplage du cosmon avec les baryons  $\ll$  gravité

avec la matière noire  $\ll$  gravité

(contraint par le principe d'équivalence, 5<sup>e</sup> force, etc.)

Le couplage du cosmon avec les neutrinos  $>$  gravité

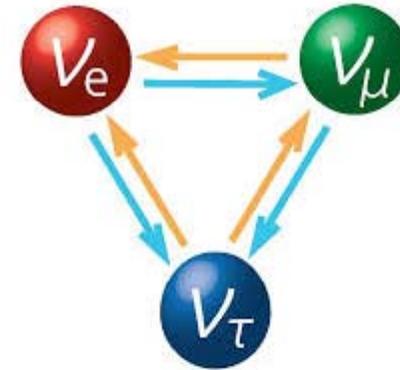
Le cosmon a une masse **négligeable**  $mc^2 \propto \hbar H_0$  soit  $10^{-68} \text{kg} \sim 10^{-60} M_{\text{pl}}$

$\rightarrow$  Interaction de très longue portée

$$H = \frac{2}{3} (1 + \varepsilon) / t$$

$$w_0 \approx -1 + \frac{m_\nu(t_0)}{12\text{eV}}$$

# Les neutrinos sont différents



- Si le couplage baryons-cosmon est très fortement contraint par les tests du principe d'équivalence et la variation des constantes fondamentales
  - Aucune contrainte sur le couplage neutrino-cosmon
- En physique des particules : le mécanisme d'obtention de la masse pour les neutrinos diffère de celui pour les fermions chargés. Le mécanisme de “seesaw” impliquent des particules lourdes dont la masse pourrait dépendre de la valeur du champ du cosmon.

# Masse des neutrinos

Dans le modèle standard des particules, les neutrinos n'ont pas de masse. Comment expliquer leur masse observée ( $\sim eV$ ) des millions de fois inférieures aux leptons?

Soit **hiérarchie normale**  $m_1 \ll m_2 \ll m_3$ , avec  $m_3 = 0.05 eV$

Soit **inversée**  $m_1 \sim m_2 \gg m_3$ ,  $m_1 = 0.05 eV$ , ou dégénérée  $m_1 \sim m_2 \sim m_3$

Mélange 
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\alpha i} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$
 On ne sait pas si  $\nu = \bar{\nu}$  (Majorana)  
ou Dirac

La masse des fermions survient pas brisure de symétrie (Higgs), mais ne marche pas pour les neutrinos

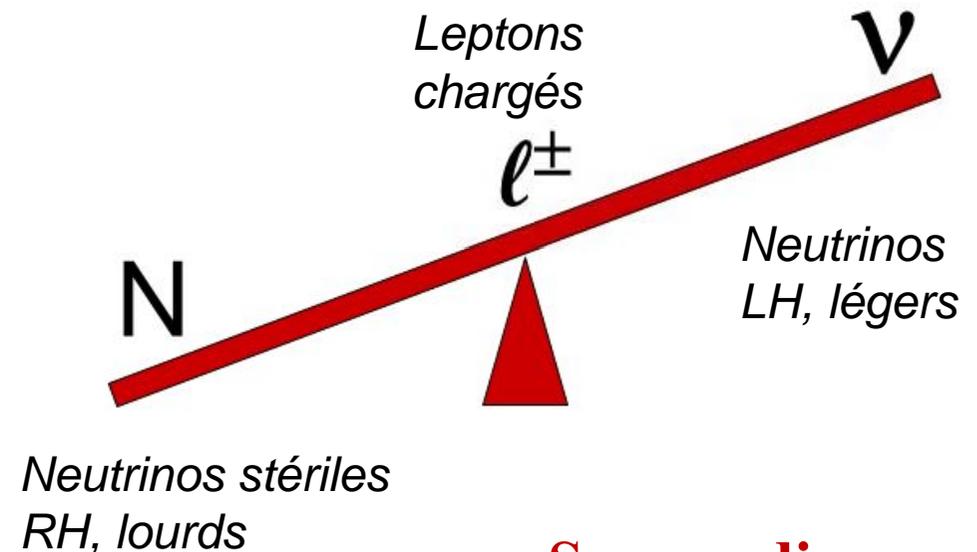
Est-ce que cela pourrait être la gravité? Non, car alors  $m_\nu = 10^{-5} eV$

# Le mécanisme de "Seesaw"

→ Type I: Hypothèse de l'existence de neutrinos "stériles" très massifs  $\nu_{RH}$  (right-handed), n'interagissant pas avec EW

Les masses sont les valeurs propres d'une matrice  $2 \times 2$ , avec  $M$ , et  $m$   
 $M \gg m$ , avec un produit constant ( $Mm$ ), d'où le cisaillement (seesaw)  
Pour le cas majorana,  $M \sim$  échelle de GUT, pour Dirac, seulement EW

→ Type II, triplet de Higgs



**Seesaw diagram**

# Pourquoi les neutrinos?



**Echelles de masse :**

Densité de l'énergie noire :  $\rho \sim (2 \times 10^{-3} \text{ eV})^{-4}$ .

Masse des neutrinos : eV ou en-dessous

**Déclat cosmologique :** Neutrinos deviennent non-relativistes assez tard dans l'histoire de l'Univers ( $z \sim 300$ , ou  $z = 0.5$  si  $m$  variable)

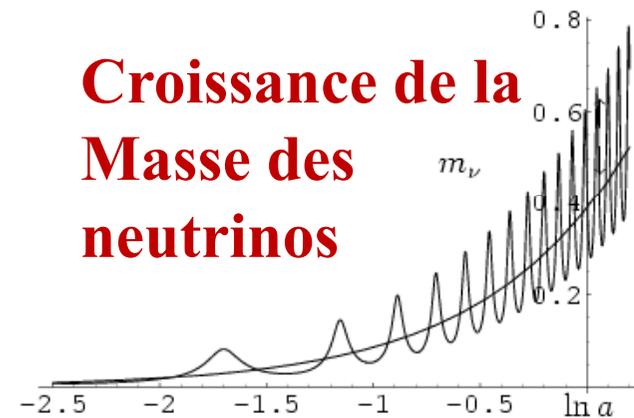
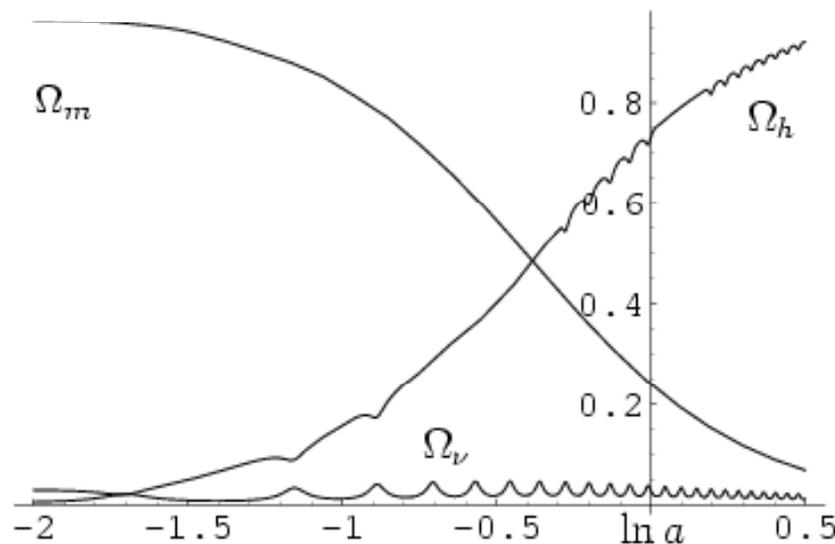
**Le couplage des neutrinos** avec le cosmon pourrait être plus fort que la gravité

La croissance de la masse des neutrinos entraîne la transition de l'énergie noire vers une valeur quasi constante

Dès que le neutrino devient non-relativiste, c'est le déclic

**Cet instant est arrivé récemment, il y a 5 Gyr !**

**Donne la bonne échelle pour l'énergie noire!**



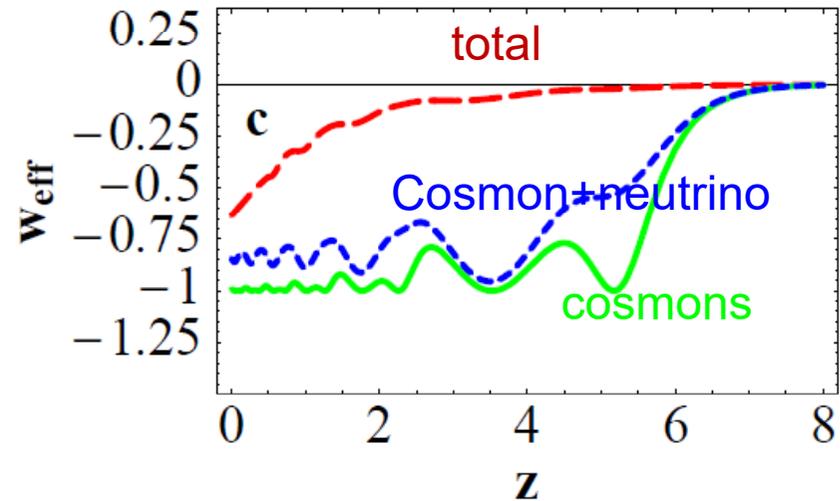
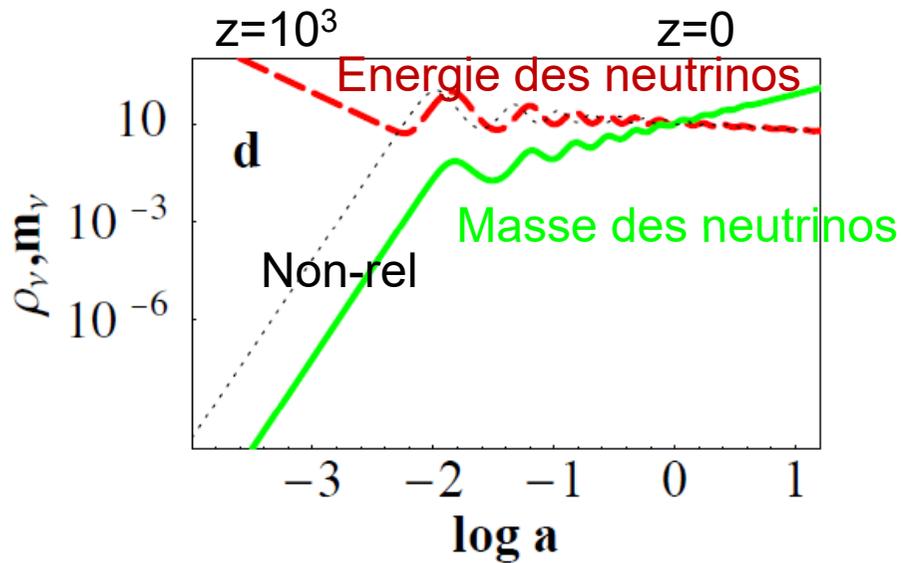
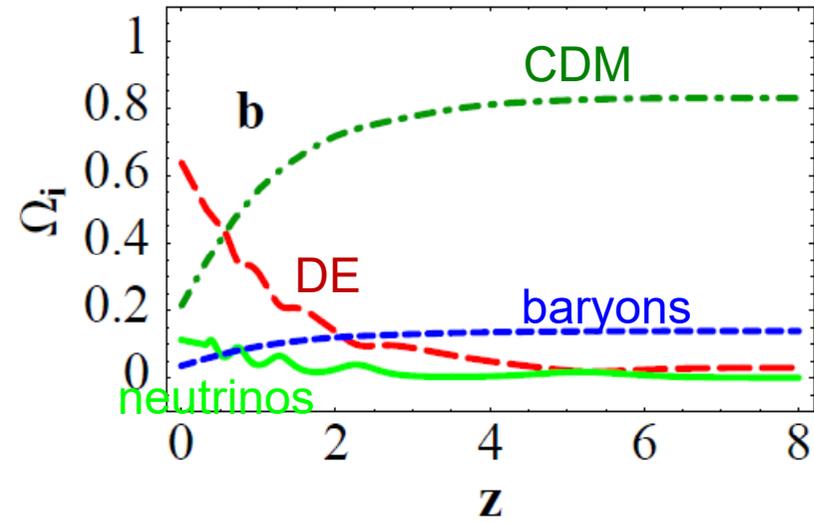
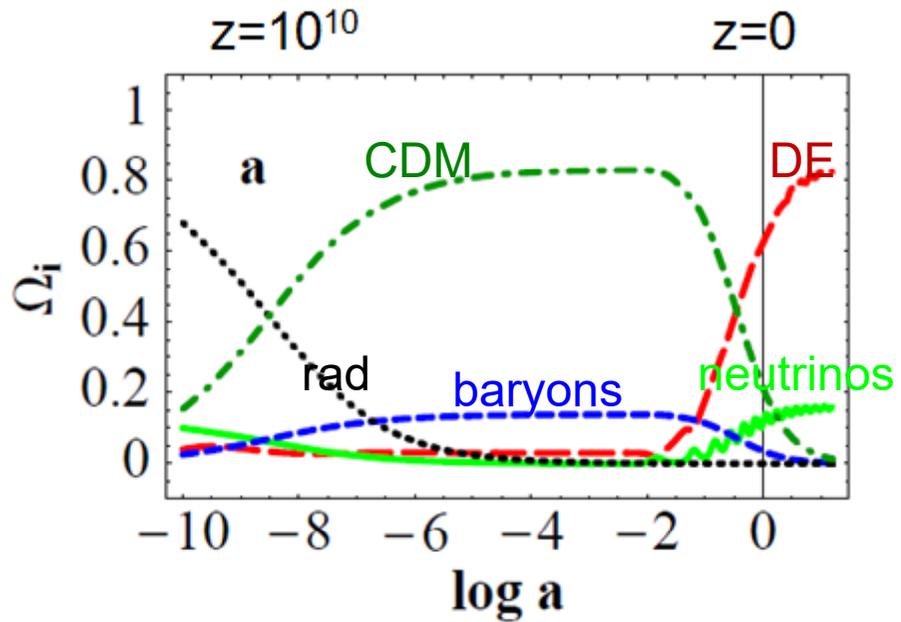
**Croissance de la  
Masse des  
neutrinos**

*Amendola et al (2008)*

$$m_{\nu 0} = 2.3 \text{ eV}$$

# Evolution du modèle

$$a = 1/(1+z)$$



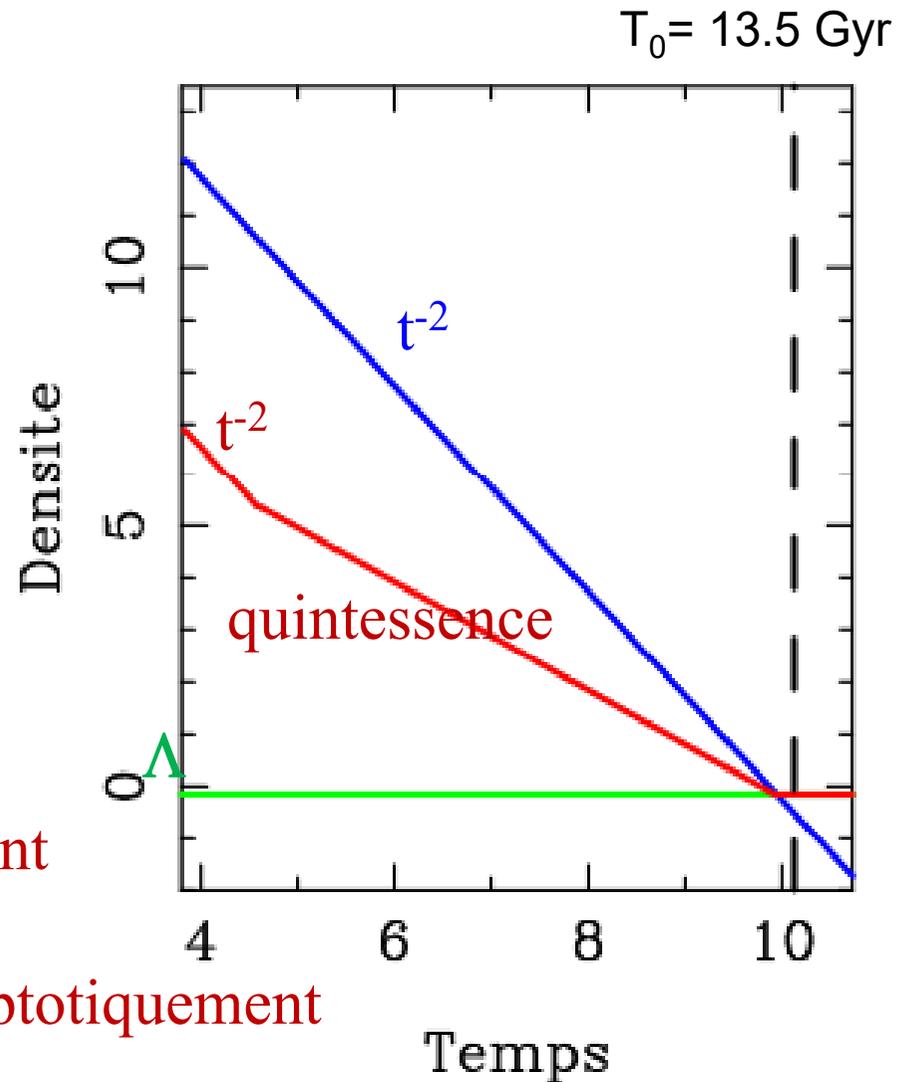
*Amendola et al (2008)*

# Evolution des densités

$$\rho \sim a^{-3} \text{ matière}$$
$$\rho \sim a^{-4} \text{ photons}$$

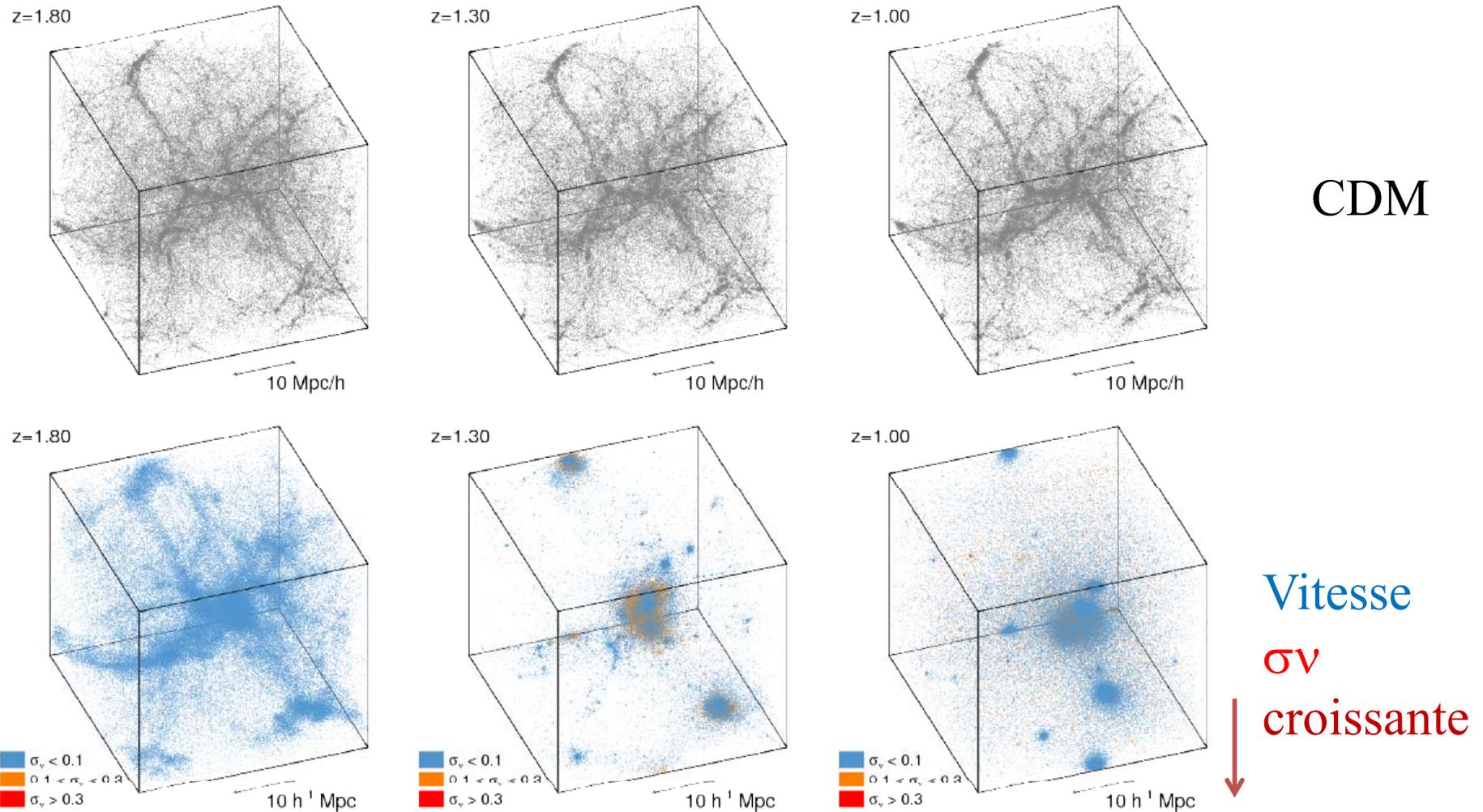
La quintessence  
ne devient égale à  
la matière que récemment

Elle devient alors asymptotiquement  
constante



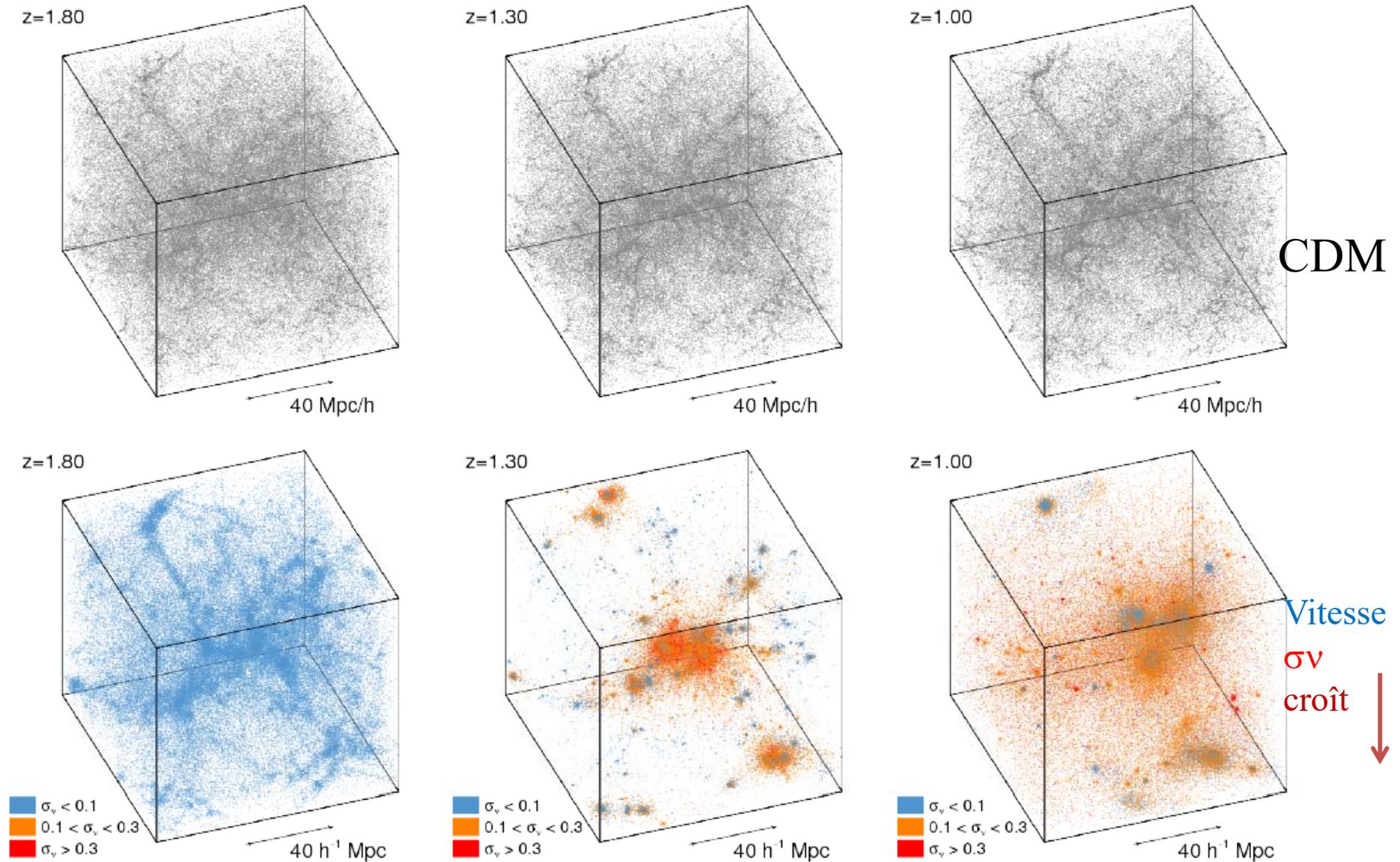
# Formation de structures avec les neutrinos

Simulation du couplage cosmon+neutrino, jusqu'à  $z=1$



Simulation N-corps de Baldi et al 2011

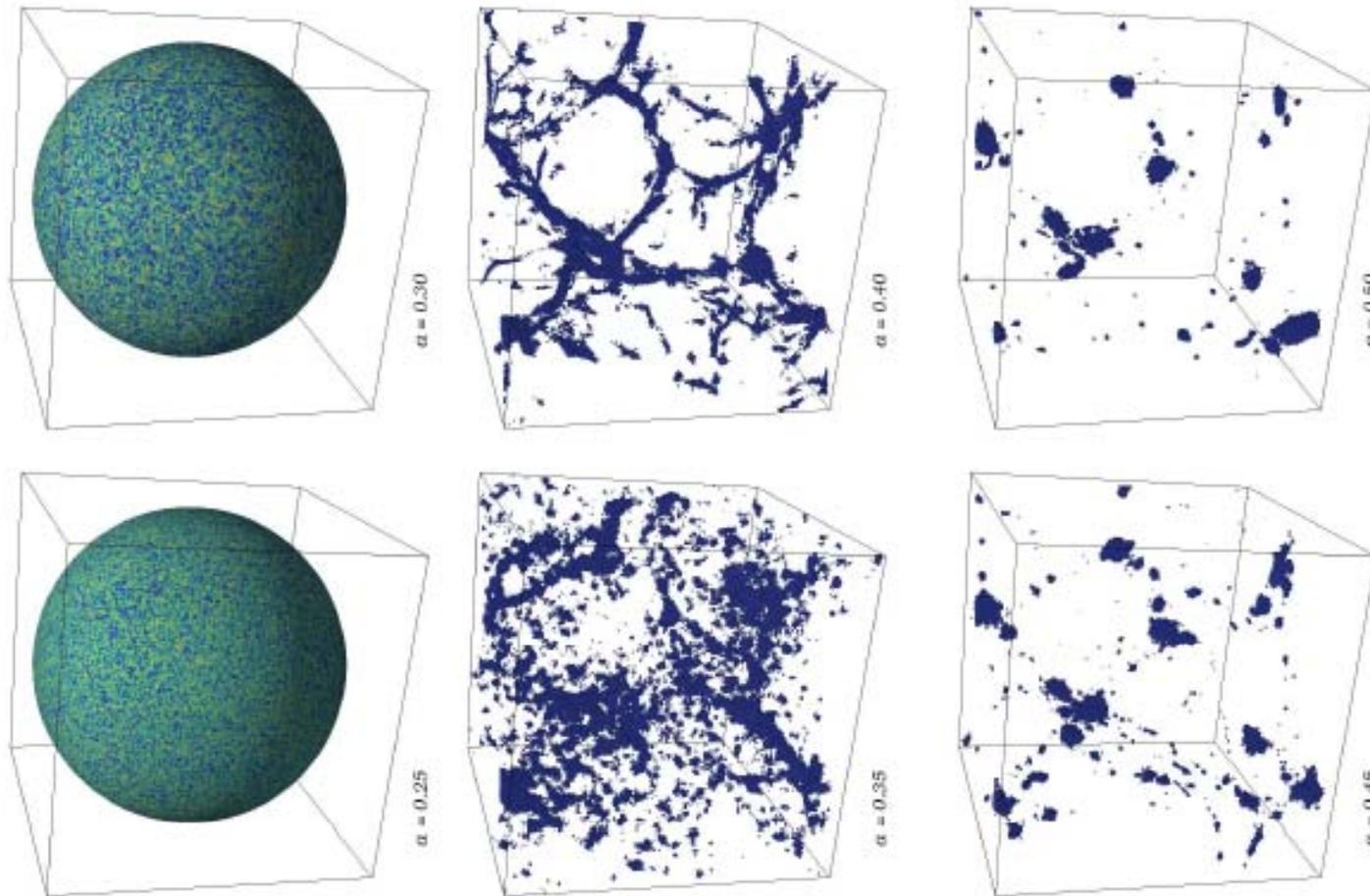
# Les neutrinos à plus grande échelle



*Baldi et al 2011*

# Formation de structures avec les neutrinos

Le couplage cosmon-neutrino équivaut à une force qui agglomère les neutrinos, qui forment des **grumeaux**  
Ces particules se comportent comme la CDM + énergie noire

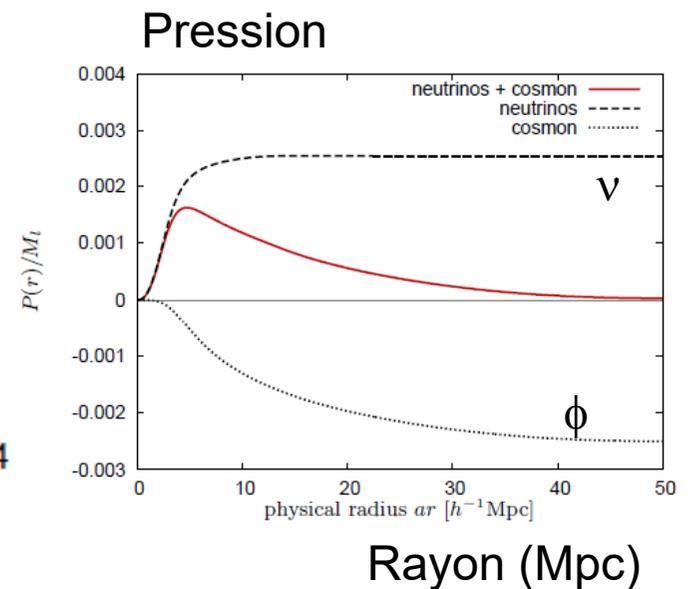
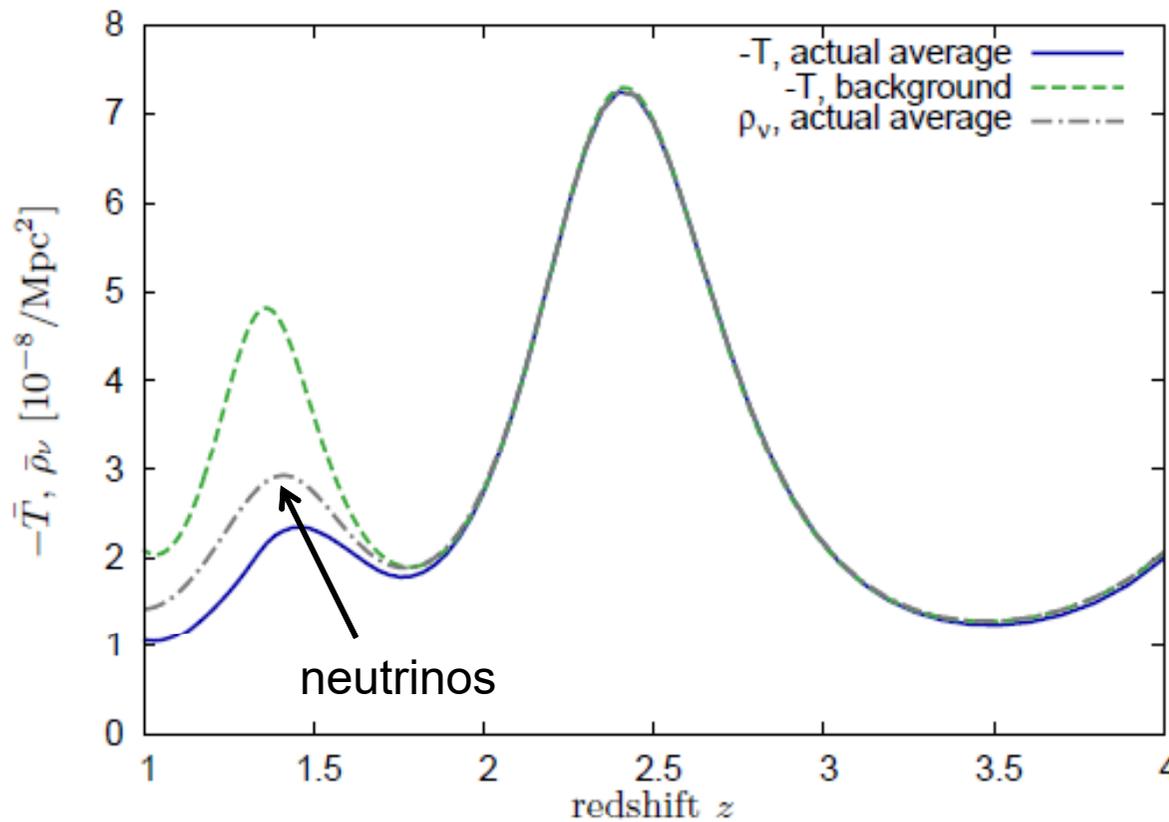


Ayaita et al 2013

# back-reaction : $T_{\mu\nu}$ des neutrinos

Il y a une grosse différence entre l'évolution du fond  
(hypothèse homogène ---)

Et la réalité comprenant l'évolution du cosmon (————)



# Des caméléons pour l'énergie noire



Particules dont la masse varie en fonction  
**de l'environnement.** Masse<sub>eff</sub> croît avec la densité  
Donc une très haute masse dans le système solaire, avec une  
faible portée (1mm). A grande échelle, portée bien plus grande (> kpc)  
→ Échappent à la détection sous forme de 5<sup>e</sup> force

Ajout de champs scalaires  $V(\phi)$  dans la théorie

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{1}{16\pi G_N} R - \frac{1}{2} (\partial\phi)^2 - V(\phi) + \mathcal{L}_m(\psi_m, A^2(\phi)g_{\mu\nu}) \right)$$

Ecart au modèle standard  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\partial \ln A}{\partial \phi}$$

se traduisant par une force

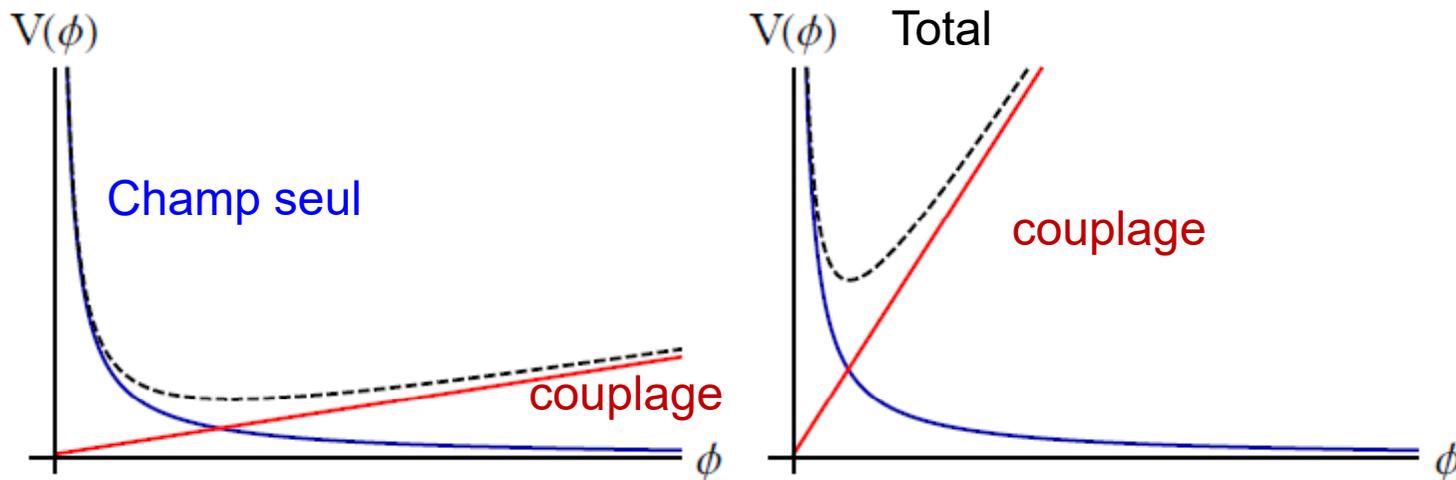
$$F = Gmm' / r^2 (1 + \alpha \alpha' e^{-mr})$$

*Khoury & Weltman 2004*

$$V_{\text{eff}}(\phi) = V(\phi) + \rho_m A(\phi)$$

# Potentiel caméléon: couplage

Le couplage avec la matière change considérablement  $V(\phi)$   
Le caméléon se camoufle!



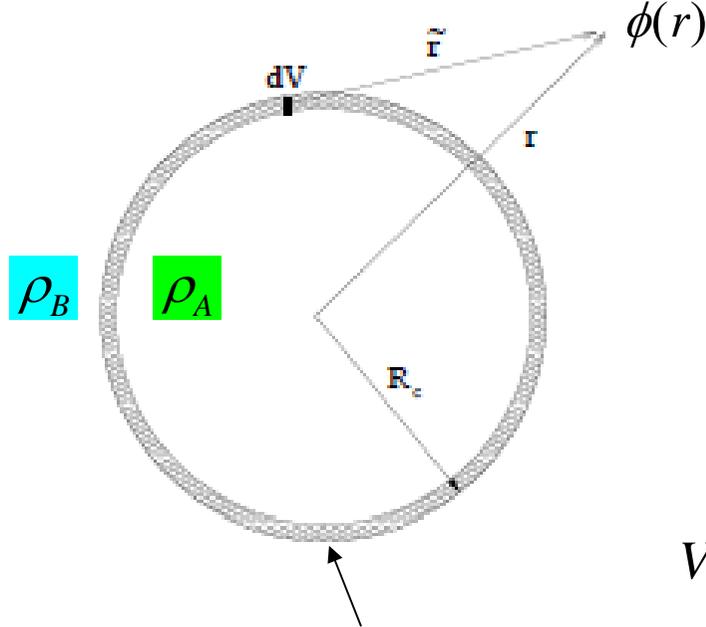
Basse densité

Haute densité

$$V_{\text{eff}}(\phi) = V(\phi) + \left(1 + \frac{\phi}{M}\right) \rho$$

# Principe du caméléon: écrantage

Système à symétrie sphérique:  
La force due aux caméléons est  
uniquement celle d'une coquille



*Khoury and Weltman (2004)*

$$\phi = (\sqrt{6}/2) \ln F$$

$$\frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\phi}{dr} = \frac{dV_{\text{eff}}}{d\phi}$$

$$V(\phi) = (RF - f)/2F^2$$

où

$$V_{\text{eff}}(\phi) = V(\phi) + e^{Q\phi} \rho$$

A l'intérieur et à l'extérieur du système  
Minima et maxima à

$$V_{,\phi}(\phi_A) + Qe^{Q\phi_A} \rho_A = 0, \quad V_{,\phi}(\phi_B) + Qe^{Q\phi_B} \rho_B = 0$$

Si le champ a une grande masse, le système  $\equiv$  **une mince coquille**

Paramètre de la coquille

$$\frac{\Delta r_c}{r_c} = \frac{\phi_B - \phi_A}{6Q\Phi_c} \ll 1$$

$\Phi_c$  : Potentiel  
gravitationnel  
à la surface

# Contraintes dans le système solaire

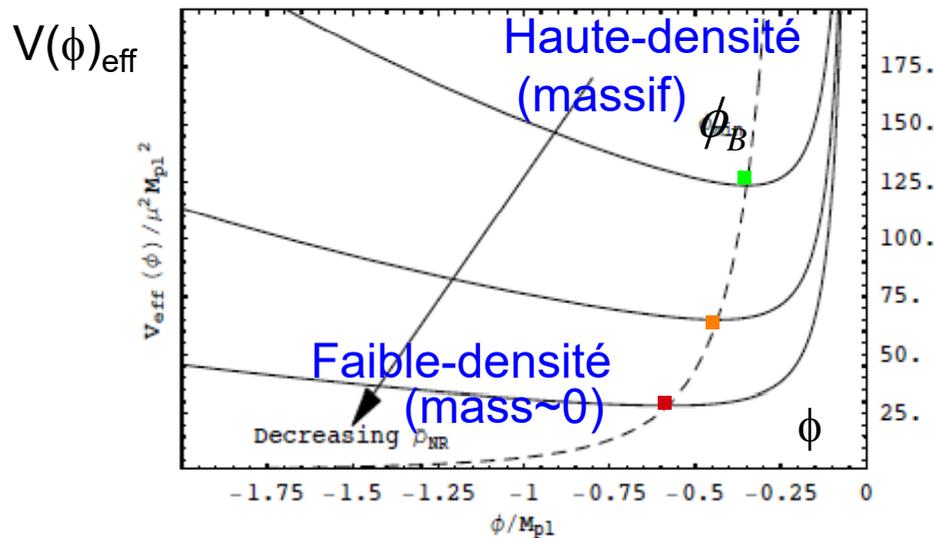
La constante de gravitation effective

$$G_{\text{eff}} = G (1 + \Delta r_c / r_c)$$

Contraintes apportées par les expériences de **force de Casimir**

Les mesures dans le système solaire donnent

$$\frac{\Delta r_c}{r_c} \approx -\frac{\phi_B}{\sqrt{6}\Phi_c} < 1.15 \times 10^{-5}$$



Pour le Soleil ( $\Phi_c \approx 10^{-6}$ ),  
 $|\phi_B| < 6.0 \times 10^{-11}$

→ Ceci est satisfait si

$$M^2 \approx 1/(3f_{,RR})$$

est grand dans la région

$$R \gg H_0^2$$

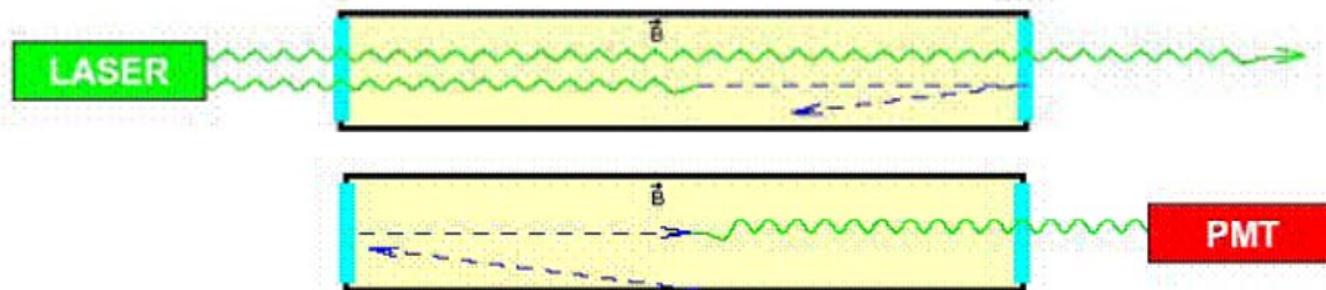
# Essai de détection

Les formules du champ scalaire ressemblent beaucoup à celles de l'axion  
Or, il existe des expériences pour détecter l'axion

Un faisceau laser traverse une zone à fort champ magnétique

Les photons créent des caméléons. Ralentis, ils restent un temps dans la chambre à vide. Après un certain temps → photons à détecter

Expérience GammeV (FermiLab, Chou et al 2008)



Les caméléons ne passent pas: trop massifs, pas d'effet tunnel  
Leur réflexions sont incohérentes avec celle des photons

*Burrage et al 2015*

## Test dans une chambre à vide



Faisceau laser, atomes de césium, sphère interne à vide (10cm): **interférence atomique**

Puisque l'effet des caméléons dépend de la densité, la portée de leur force sera maximum dans le vide

Expérience avec une sphère d'aluminium dans lequel on fait le vide

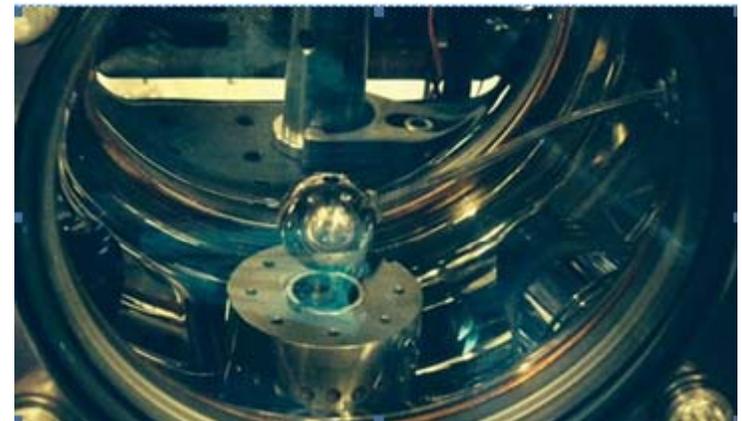
Un faisceau d'atomes de césium est séparé par le laser

Les pulses laser font interférer les atomes entre eux

Les interférences de ces atomes devraient être perturbées par la force des caméléons

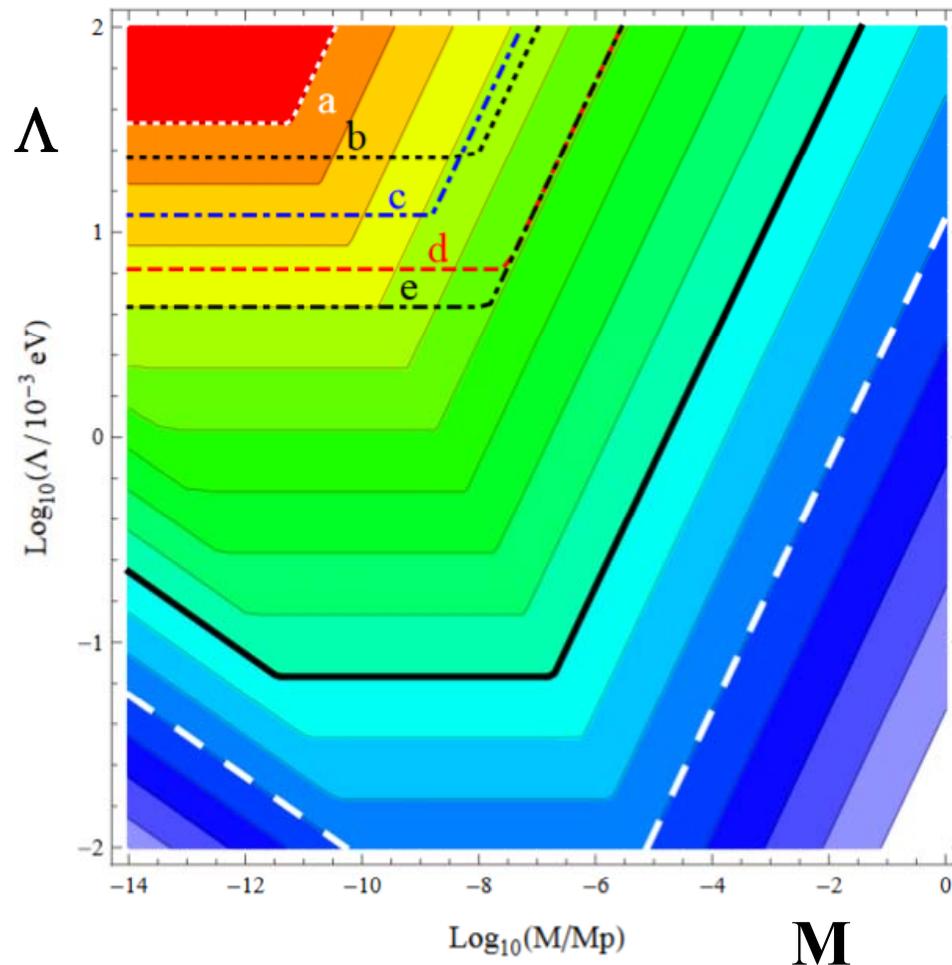
→ résultat négatif

Pourrait encore descendre d'un facteur 10!



# Limites supérieures sur les caméléons

Les atomes de césium sont si peu nombreux qu'ils n'affaiblissent pas le champ des caméléons



$$\nabla^2 \phi = -\frac{\Lambda^5}{\phi^2} + \frac{\rho}{M}$$

$\text{Log}_{10}(\text{acceleration/g})$

$$\phi_{\text{eq}} = (\Lambda^5 \bar{M} / \rho)^{1/2}$$

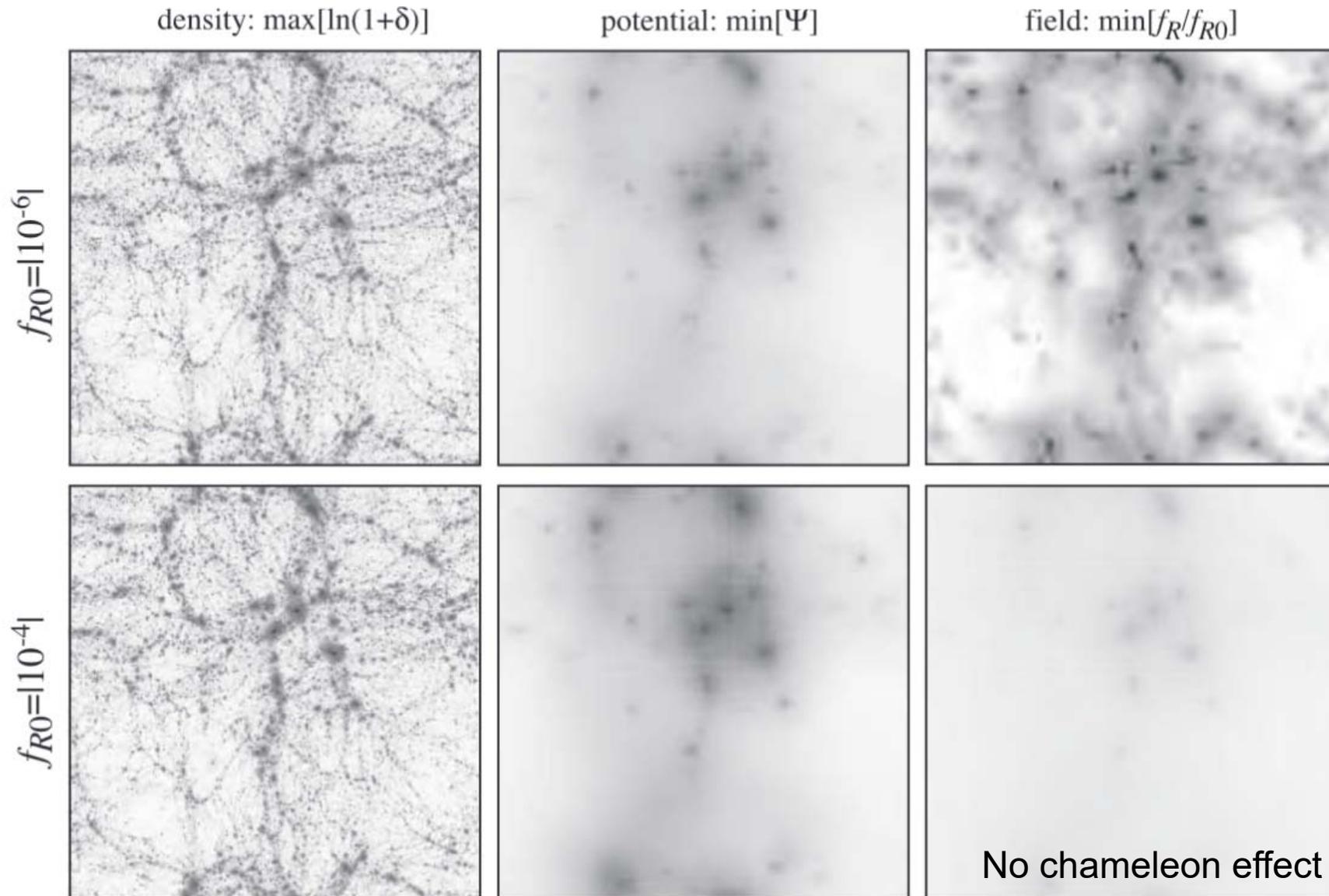
$\Lambda$  force du champ,

$M$  le couplage

$M_p = 2 \cdot 10^{18} \text{ GeV}$

→ Déjà autour de g  
Demain bien en-dessous

# Simulations des caméléons



*Oyaizu, Lima, Hu (2008)*

# Théories des Galiléons

Champs scalaires *Goon et al (2014)*

Le mécanisme **d'écrantage de Vainshtein** supprime la 5e force dans un certain rayon au voisinage de sources massives, où le régime devient très non-linéaire (discontinuité quand  $m\text{-grav} \rightarrow 0$ )

Les théories galiléon peuvent être interprétées naturellement comme des branes se déplaçant dans des espaces-temps à dimension supérieure

Galileons  $\sim$  modes de Goldstone qui surviennent lorsque des symétries de l'espace-temps sont spontanément brisées

Le phénomène est décrit par des équations qui restent du second ordre, ce qui garantit l'absence de fantôme et d'instabilité



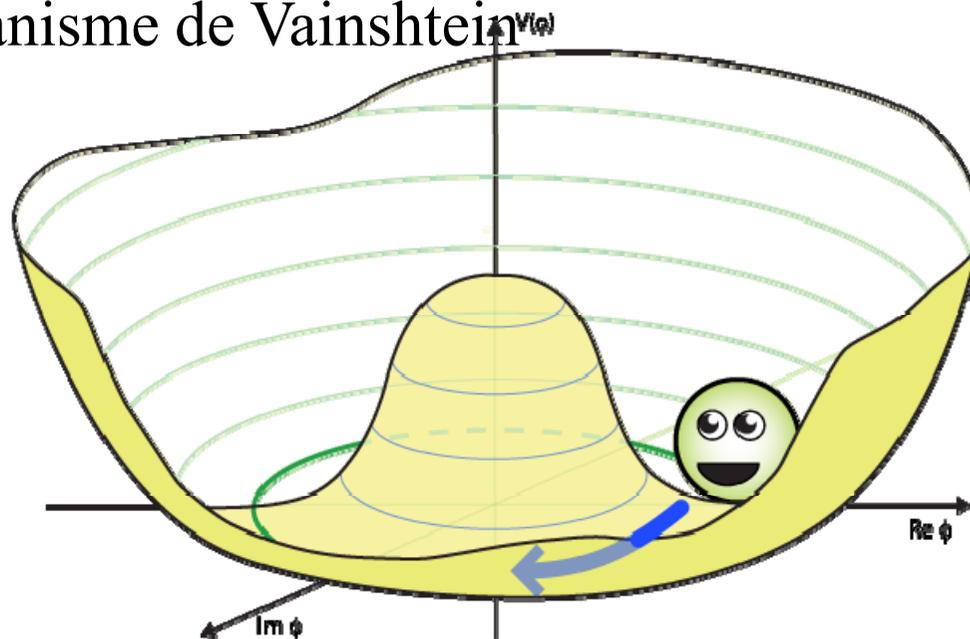
# Galileons et modes de Goldstone

Après une brisure de symétrie, l'énergie se retrouve dans des oscillations de basse énergie, les modes de Goldstone

Reliées aux bosons de Goldstone ( $m=0$ ,  $\text{spin}=0$ )

Il existe aussi un écrantage avec les Galileons

Analogue au mécanisme de Vainshtein



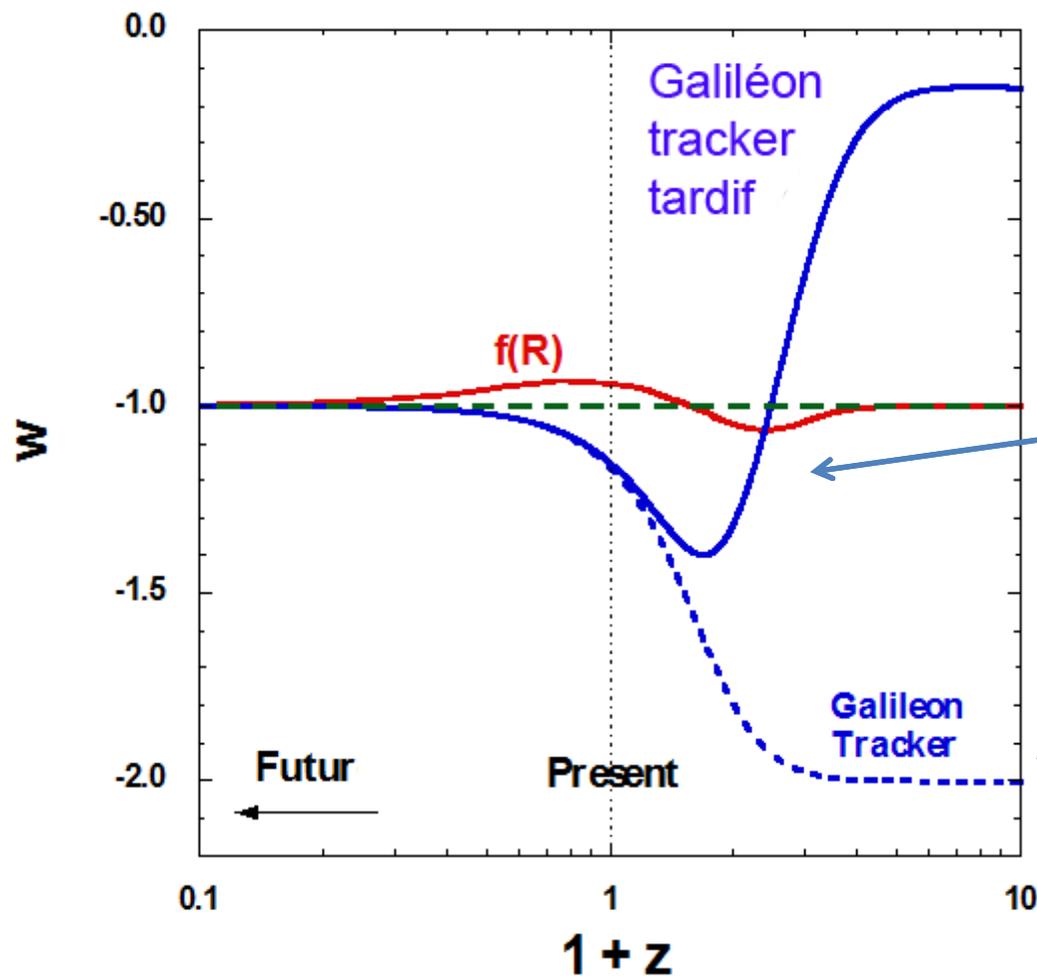
Le Lagrangien est construit pour satisfaire la symétrie Galiléenne  
Dans un espace-temps plat

$$\partial_\mu \phi \rightarrow \partial_\mu \phi + b_\mu$$

# Les galiléons non favorisés par les données

Galiléons:

$$K = -c_2 X, \quad G_3 = \frac{c_3}{M^3} X, \quad G_4 = \frac{1}{2} M_{\text{pl}}^2 - \frac{c_4}{M^6} X^2, \quad G_5 = \frac{3c_5}{M^9} X^2$$



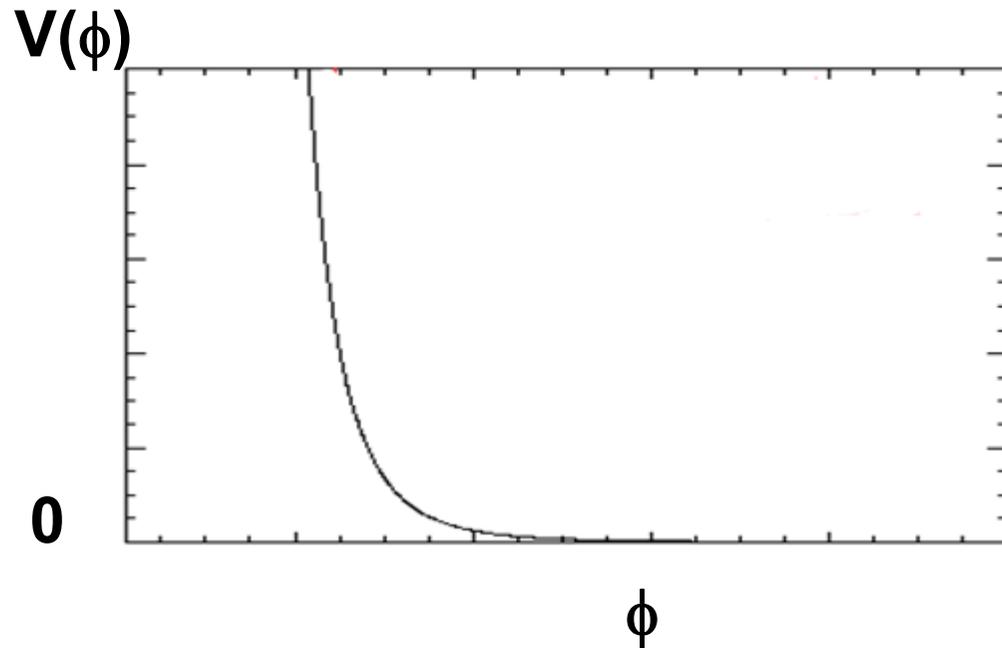
Galiléons, seulement les solutions tracker tardif sont permises

Solutions tracker ordinaires éliminées

# Le proto-type de quintessence

Un modèle typique, où tous les caractères principaux sont discutés

$$V(\phi) = M^{4+n} \phi^{-n}, \quad (n > 0)$$



Deux paramètres libres:

M: Échelle d'énergie

n: index de puissance

$$p = \frac{1}{2} \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 - V(\phi)$$

doit être négatif, donc

$d\phi/dt$  doit être faible

$V(\phi)$  lentement variable

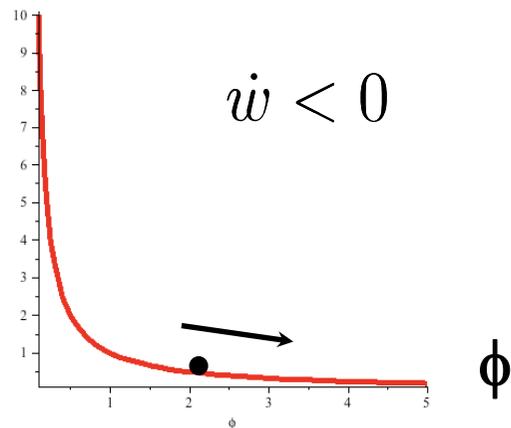
# Modèles de quintessence

$$w = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

→ Quintessence, ou  $w$  dépend surtout du potentiel

(a) Modèles de congélation

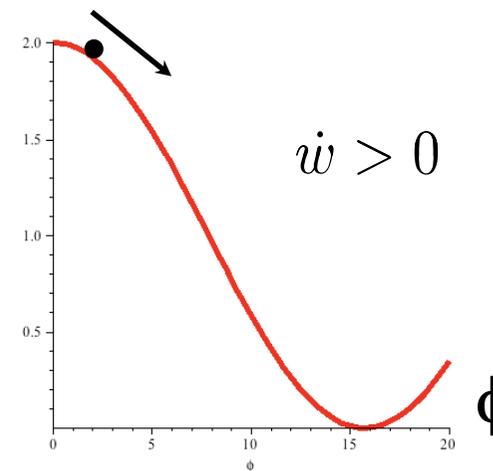
$$V(\phi) = M^{4+n}\phi^{-n}, \quad (n > 0)$$



**w décroît jusqu'à -1**

(b) Modèles de dégel

$$V(\phi) = \mu^4 [1 + \cos(\phi/f)]$$



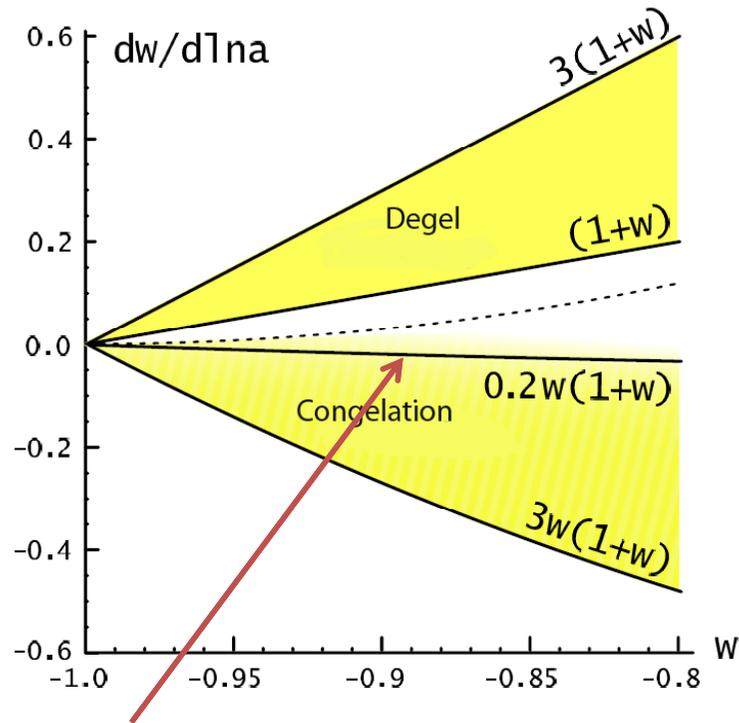
**w croît à partir de -1**

*e.g. PANGB  
Pseudo-boson  
(Nambu-  
Goldstone)*

→ k-essence, ou  $w$  dépend surtout de l'énergie cinétique

Typiquement, l'évolution de  $w$  est semblable aux modèles (b) de décongélation

# Congélation-- Dégel



Permet de distinguer 2 types de quintessence  
quelque soit le modèle  $V(\phi)$  adopté  
Fonction de  $w$ ,  $w'$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V' = 0$$

Les modèles commencent en-dessus  
mais finissent en dessous après  $z=1$

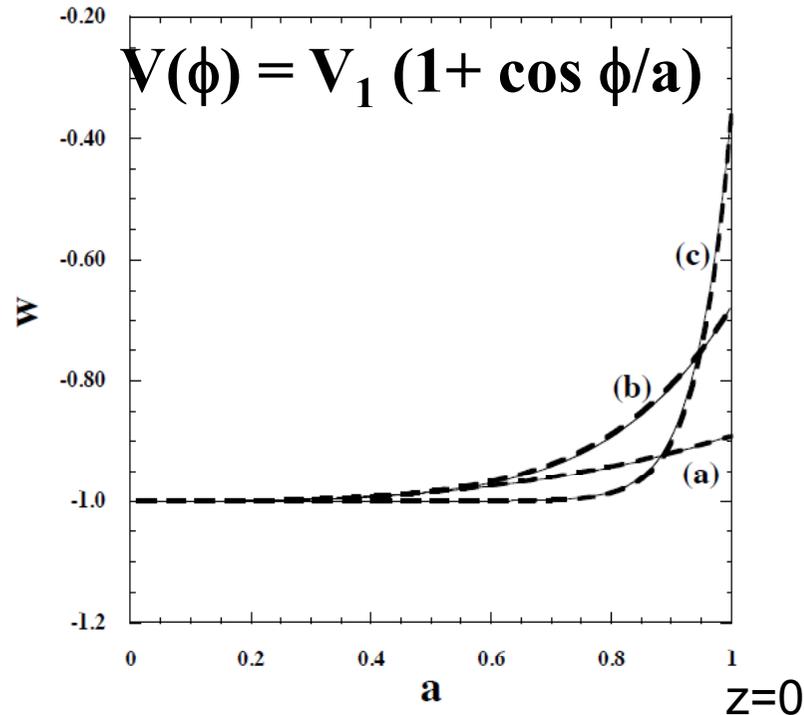
$$P/\rho = w = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

(1) Le freinage de Hubble ( $3H\dot{\phi}$ )  
aurait gelé le système hors équilibre,  
( $w=-1$ ) qui aujourd'hui se dégèle

(2) Système en mouvement au début  
qui ralentissent et se gèlent  
 $w \rightarrow -1$

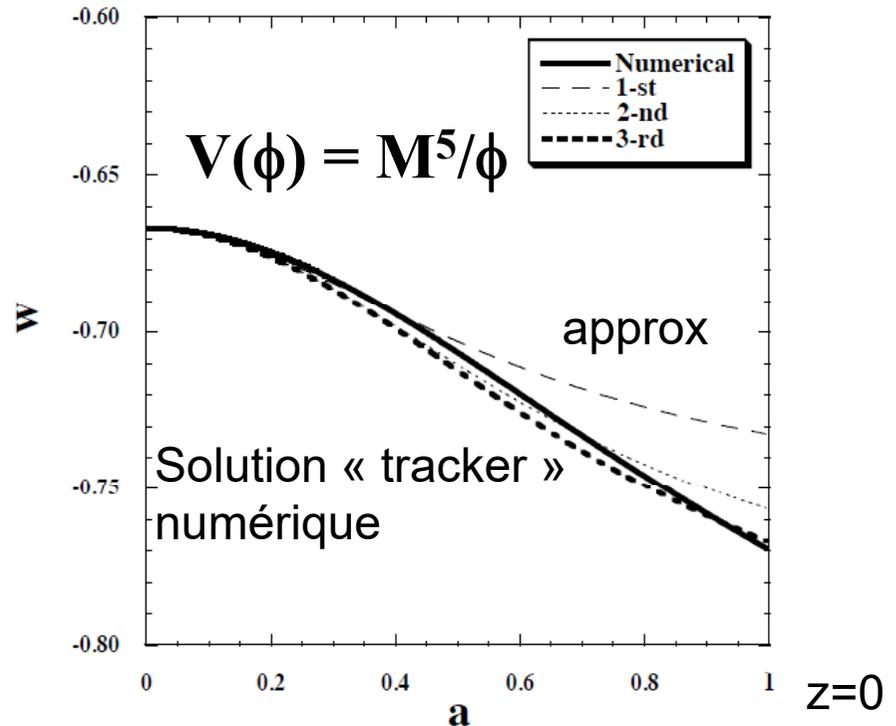
# Exemples typiques

Dégel



e.g. PNGB Pseudo-boson  
(Nambu-Goldstone)  
Masse du champ  $\phi$  très faible  
 $m^2 = V'' < H \sim 10^{-33} \text{eV} = 2 \times 10^{-69} \text{kg}$

Congélation



Type de la théorie  
supersymétrique  $SU(N_c)$   
 $N_c$  couleurs  
 $N_f$  saveurs  
*Binétruy (1999)*

# Limites de la quintessence

Plusieurs modèles représentés

Afin de les distinguer avec les observations, il faudrait une résolution en  $dw/d\ln a$  de l'ordre de  $(1+w)$  !!

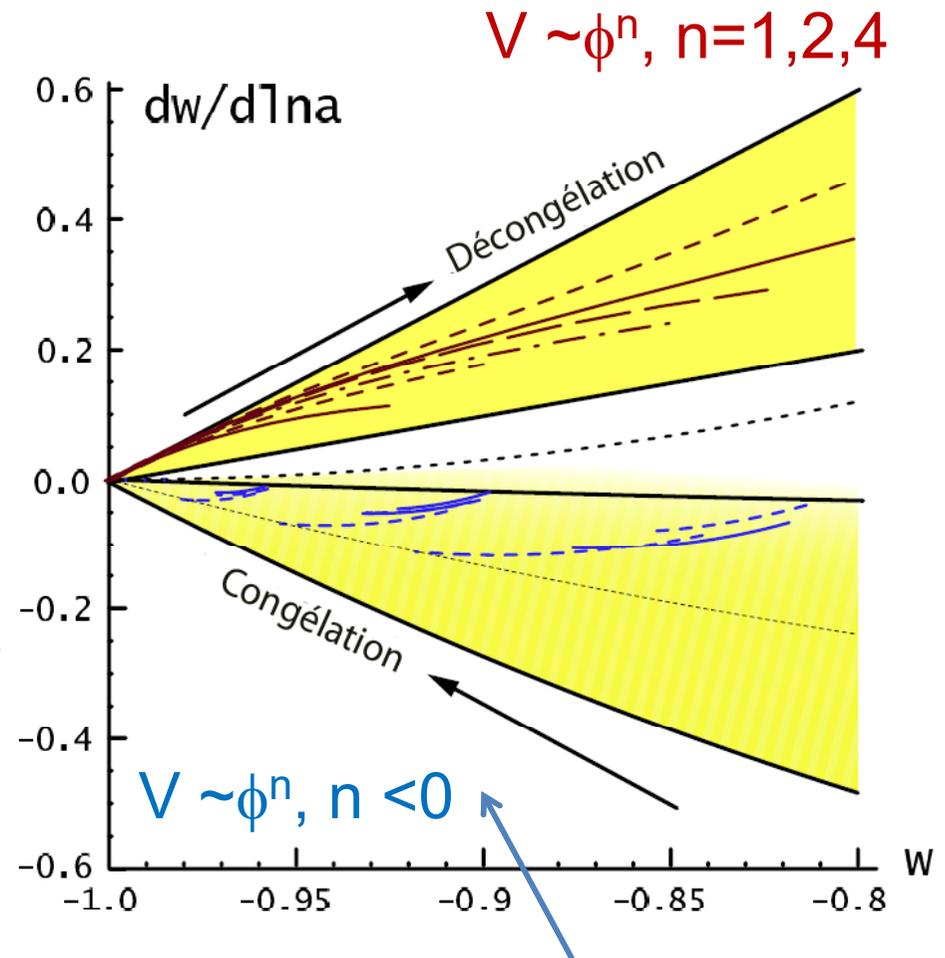
Pour  $E \equiv |V/(dV/d\phi)| < M_p$

Alors les modèles doivent avoir

$1+w > 0.004$  (degel)

$1+w > 0.01$  (congélation)

→ Limites de la quintessence



Il existe des solutions « tracker »

# K-essence

**Quintessence:** 5<sup>e</sup> élément, après les baryons, CDM, photons et neutrinos

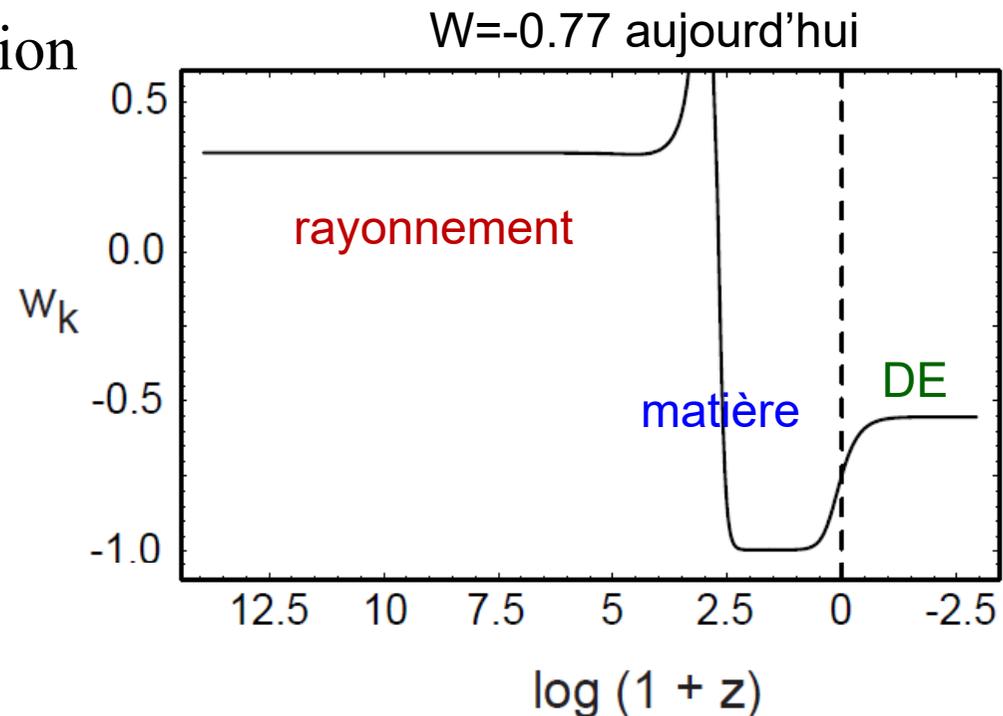
La quintessence correspond à un champ

**k-essence, kinetic-essence**

La pression négative de l'énergie noire serait due au terme non-linéaire de l'énergie cinétique du champ

Le champ cosmon a une évolution qui suit l'évolution du fond sous-jacent

Peut changer d'évolution selon les ères: rayonnement, matière, etc.



# K-essence (suite)

Selon le fond sous-jacent, on appelle ces **solutions** « **tracker** »

-- pendant l'ère du rayonnement, la k-essence ne domine pas, mais son évolution est parallèle à celle du rayonnement. Rapport de densité reste fixe vs radiation (par exemple 1/100). Le rapport voisin de 1 serait dû en quelque sorte à une équipartition de l'énergie

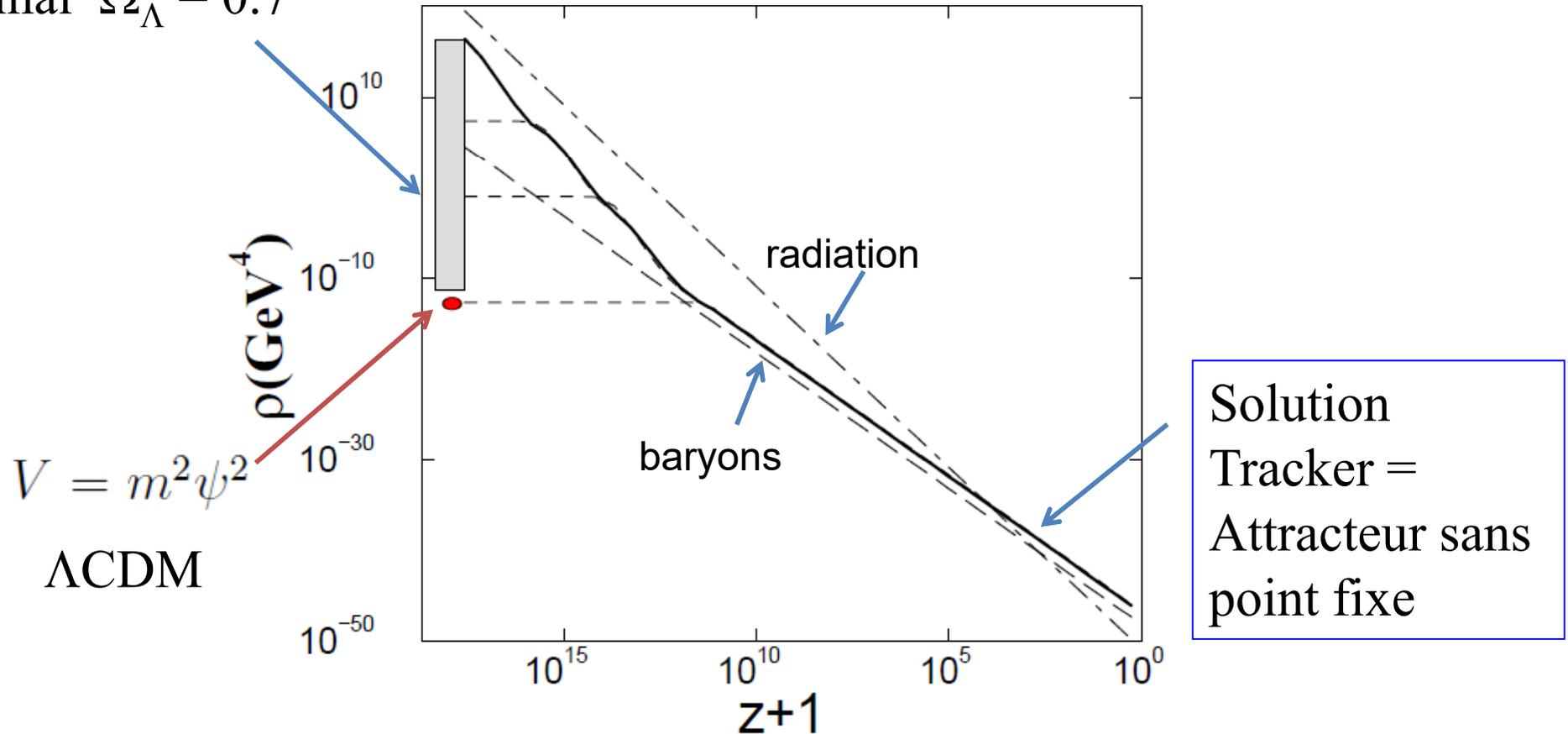
-- pendant l'ère de la matière, où  $p=0$ , la k-essence ne peut pas suivre et reste gelée, de densité constante

-- à la fin, la valeur relaxe vers une valeur asymptotique correspondant à  $-1 < w < 0$

-- la solution « tracker » est **un attracteur** dans le sens que le système tend vers la même solution, quelles que soient les conditions initiales

# Le principe du tracker

Très grande gamme de conditions initiales, qui conduisent au même état final  $\Omega_\Lambda = 0.7$

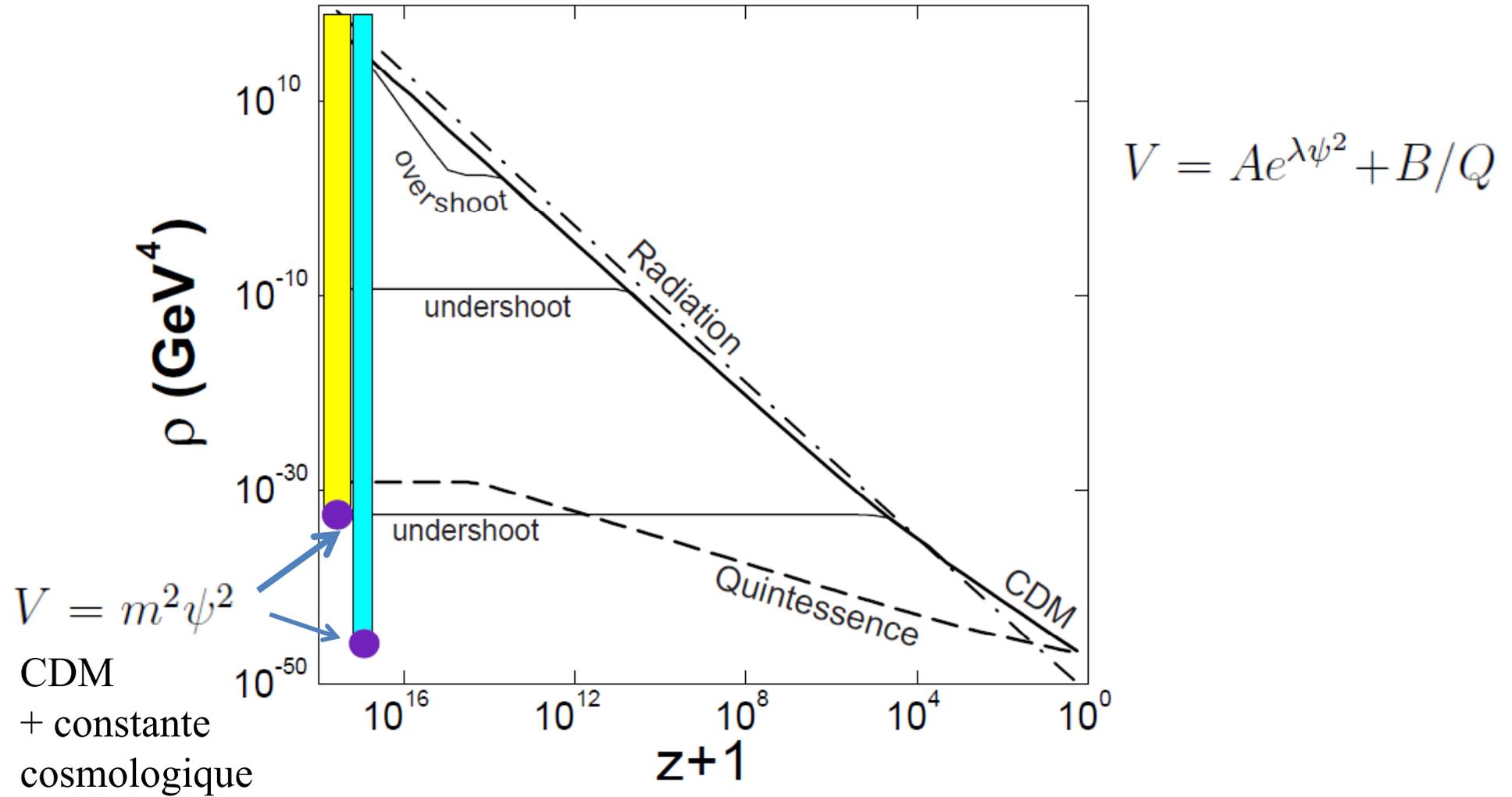


$V = m^2\psi^2$   
 $\Lambda$ CDM

$V = m^2\psi^2 + \beta^2\psi^{12}$

Zlatev et al 1999

# Quintessence Tracker



*Zlatev et al 1999*

# Modèles de K-essence

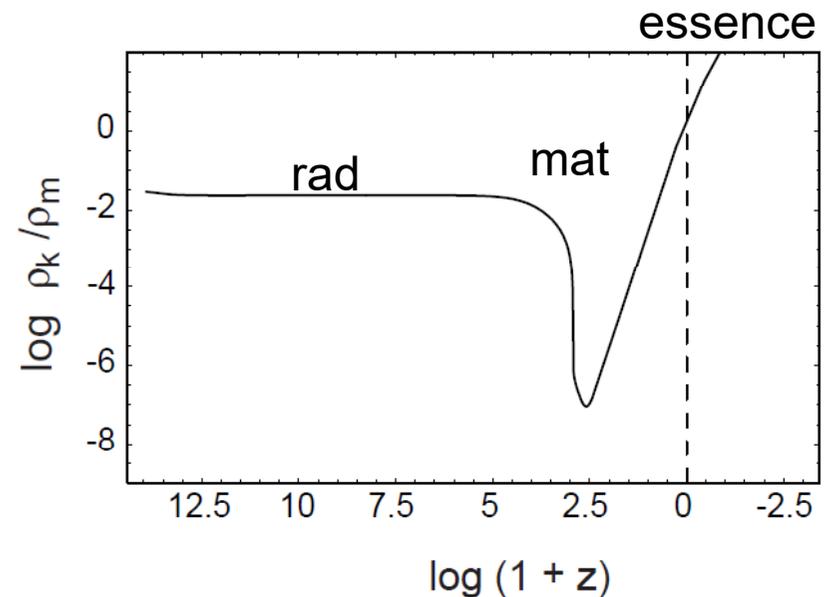
- Fonction cinétique  $k(\phi)$  : paramétrise les détails du modèle de k-essence

- $k(\phi) = k = \text{const.}$  à potentiel exponentiel
- $k(\phi) = \exp((\phi - \phi_1)/\alpha)$  loi de puissance inverse
- $k^2(\phi) = "1/(2E(\phi_c - \phi))"$  de transition

- Critère du caractère naturel

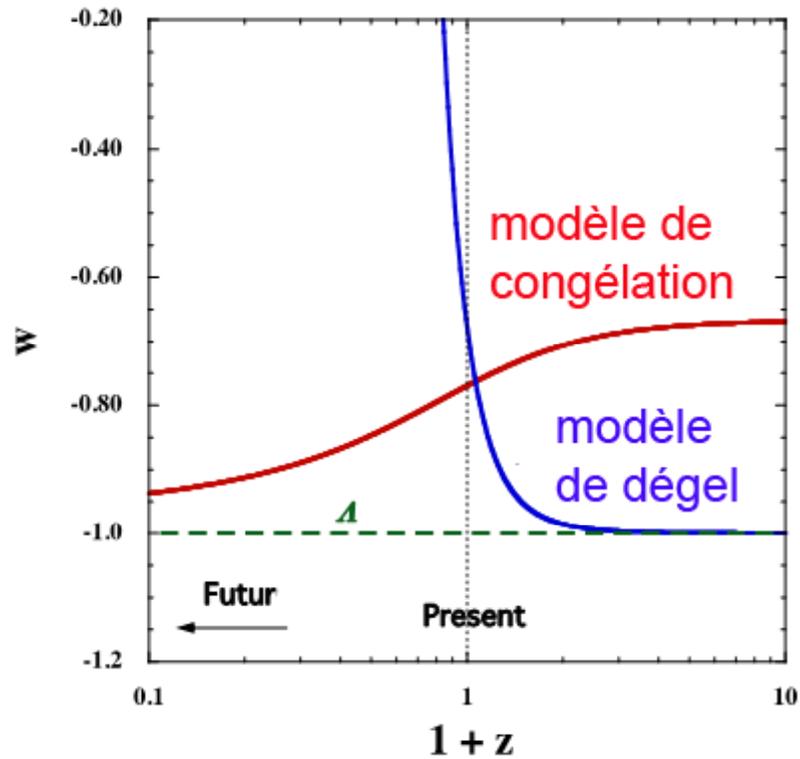
$k(\phi=0)/k(\phi_{\text{aujourd'hui}})$  : non extrême

- sinon, cas spécial à expliquer



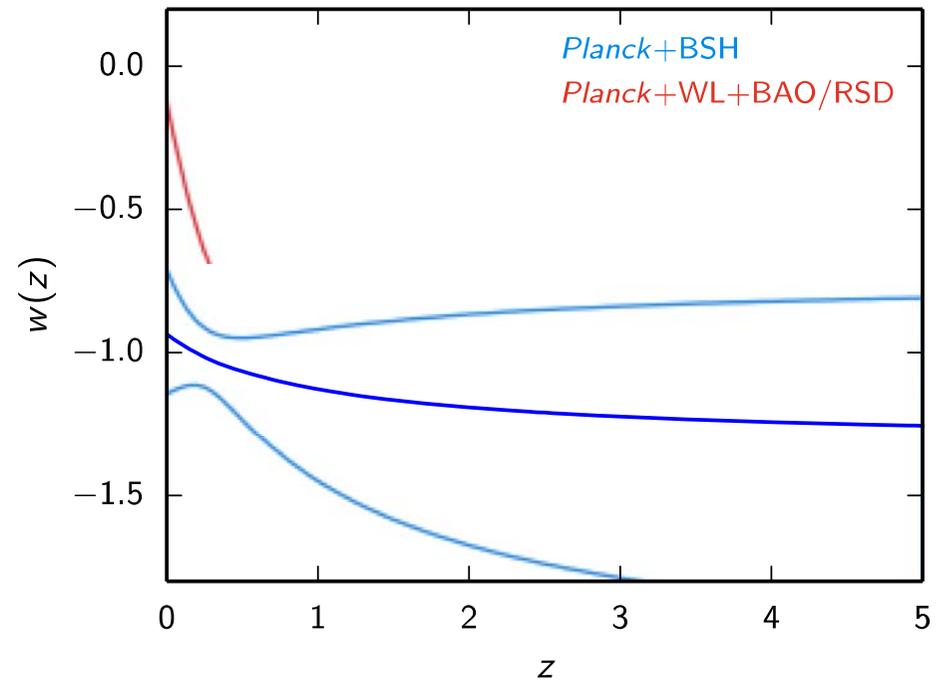
# Comparaison: Théorie et Observations

Théorie



Observations, pour

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$



→ Le modèle de congélation a des problèmes

→ Le modèle de dégel est encore compatible avec les données.



# Modèle du gaz de Chaplygin

Gaz de Chaplygin (1904)

$$P = -A/\rho$$

$$(A > 0)$$

Gaz de Chaplygin généralisé

$$P = -A/\rho^\alpha \quad (\alpha > 0)$$

Correspond à un modèle unifié où l'énergie noire et la matière noire sont un même composant: appelé aussi **UDM quartessence**

Passé:  $\rho$  très grand  $\rightarrow P \approx 0$  (matière noire)

Aujourd'hui:  $\rho$  petit  $\rightarrow P < 0$  (énergie noire)

Equation de Continuité:  $\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0$

$$\rightarrow \rho(t) = \left[ A + \frac{B}{a^{3(1+\alpha)}} \right]^{1/(1+\alpha)}$$

# Paramétrisation de Chaplygin

Avec l'équation de Friedmann  $3H^2 = 8\pi G\rho$

On peut déduire

$$\rho(z) = \rho_* \left[ 1 - \Omega_m^* + \Omega_m^* (1+z)^{3(1+\alpha)} \right]^{1/(1+\alpha)}$$

Où  $\rho_* = (A + B)^{1/(1+\alpha)}$ ,  $\Omega_m^* = \frac{B}{A + B}$

L'équation d'état  $P = w \rho$ , est

$$w(z) = - \left[ 1 + \frac{\Omega_m^*}{1 - \Omega_m^*} (1+z)^{3(1+\alpha)} \right]^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \text{passé: } w \approx 0 \\ \text{Futur: } w \approx -1 \end{array} \right.$$

La valeur aujourd'hui est  $w(0) = -(1 - \Omega_m^*)$

On peut obtenir le gaz de Chaplygin avec une action de d-branes évoluant dans un espace-temps  $(d + 2)$

# Chaplygin et les observations

$\alpha$  doit être assez petit, sinon la vitesse du son empêche les structures de se former

$$w_{ch}(a) = -\frac{Aa^{3(\alpha+1)}}{(1-A) + Aa^{3(\alpha+1)}}$$

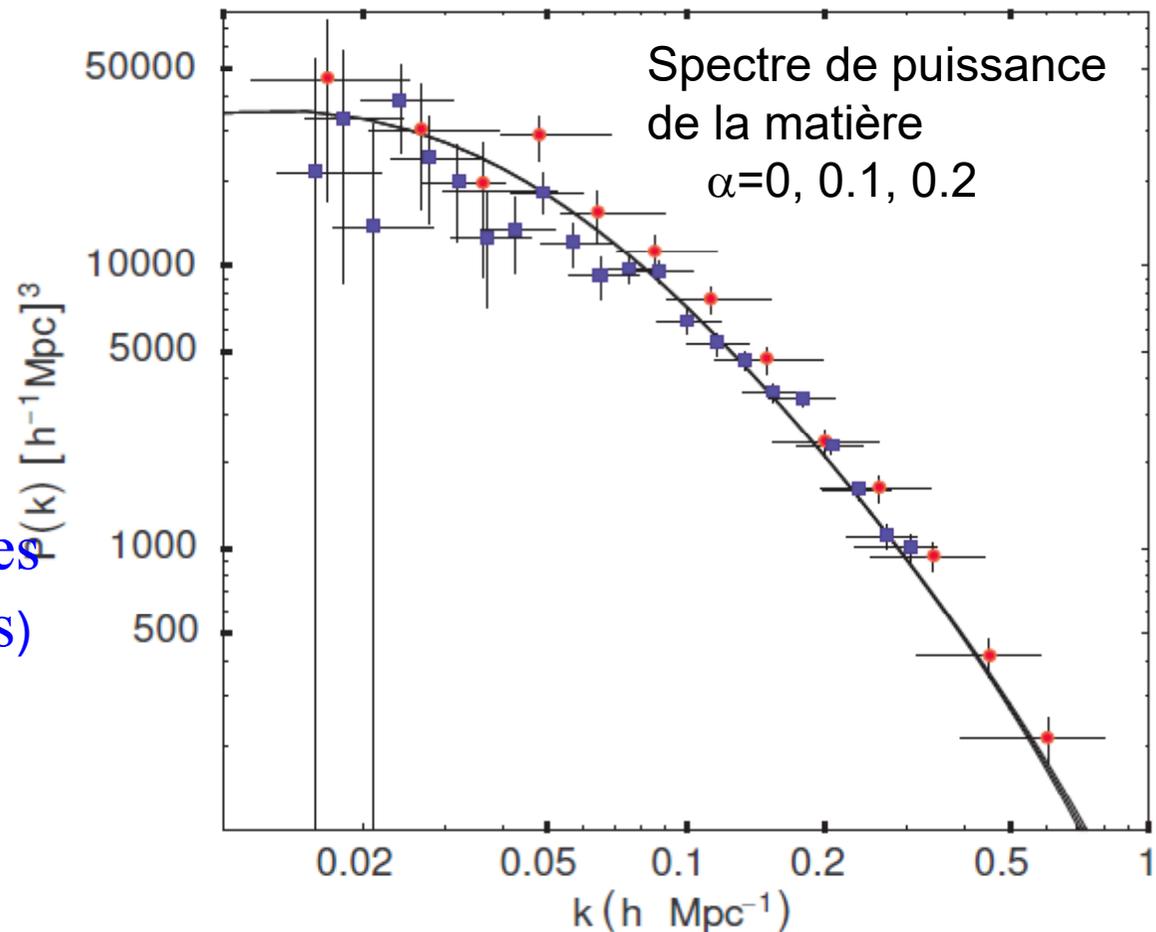
$$c_{sch}^2 = -\alpha w_{ch}(a).$$

D'autre part, il doit exister des perturbations d'entropies (pas seulement adiabatiques)

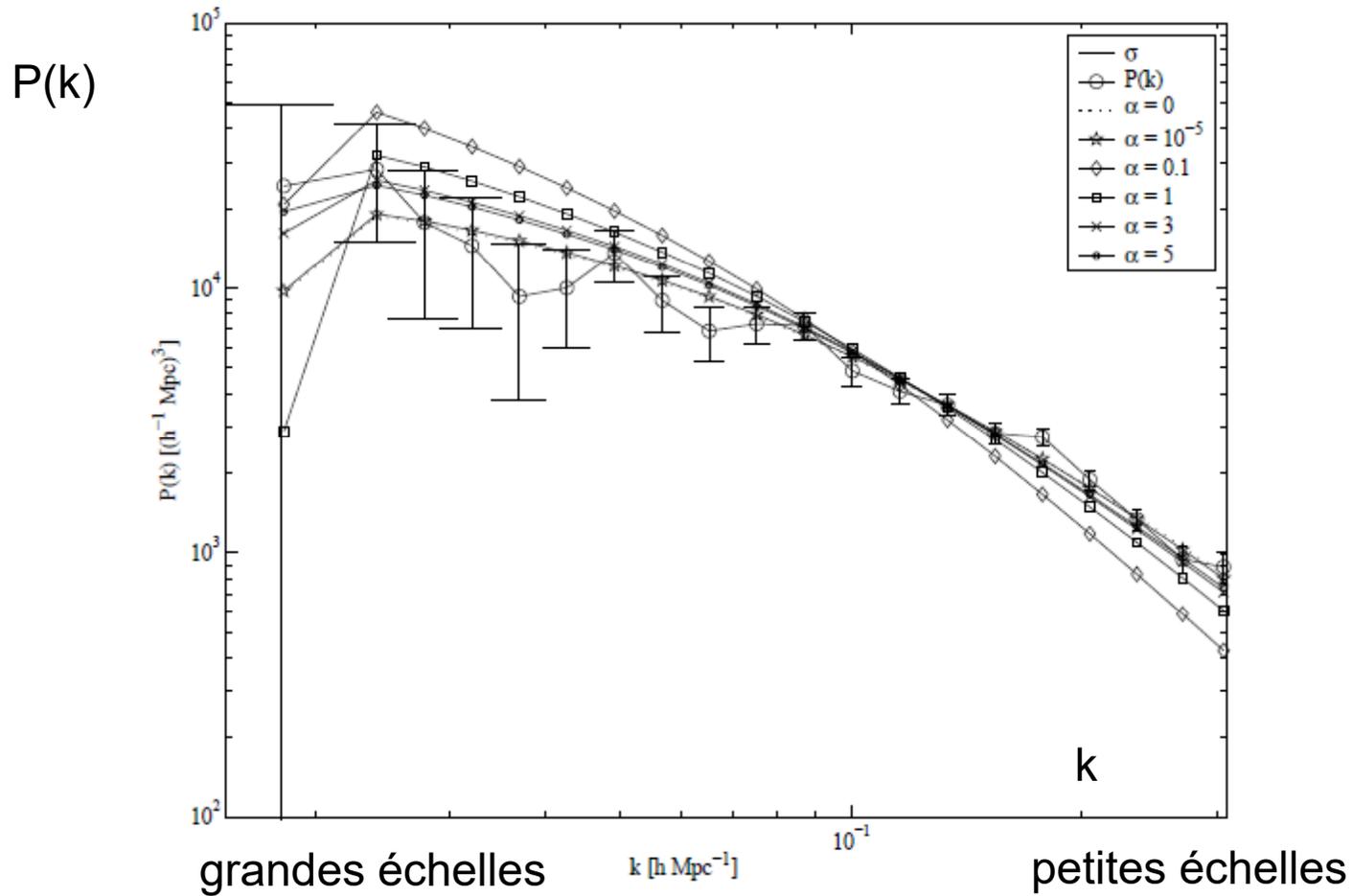
Autres extensions: viscosité

Modèle holographique...

Admet une généralisation supersymétrique



# Autres valeurs de $\alpha$



$\alpha$  petit, trop semblable à  $\Lambda$ CDM,  
 $\alpha > 3$  serait une solution, superluminique (Moschella, 2008)

# Modèles tachyoniques

$v/c = pc / (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$  Tachyons → masse  $m$  négative

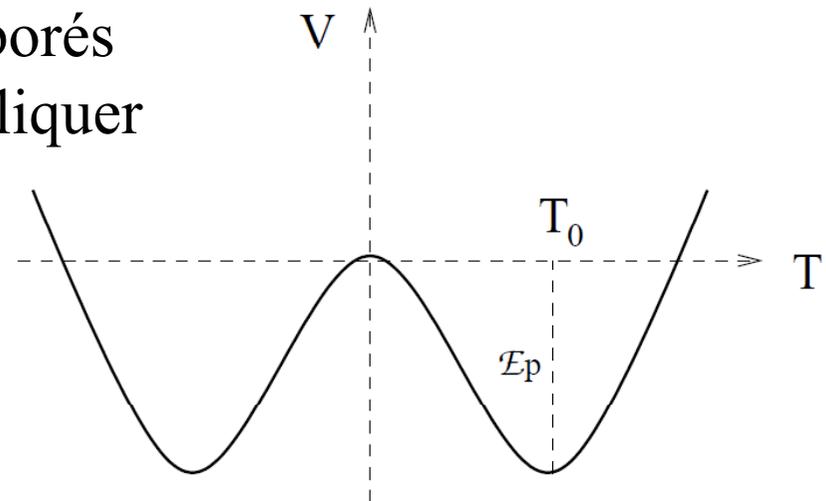
Pour un champ scalaire  $M^2 = V''(\phi=0)$  → instable ?

Construction d'un champ scalaire, avec la même évolution que le gaz de Chaplygin

$$L(\phi) = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

$$V(\phi) = \frac{1}{2} \sqrt{A} \left( \cosh 3\phi + \frac{1}{\cosh 3\phi} \right)$$

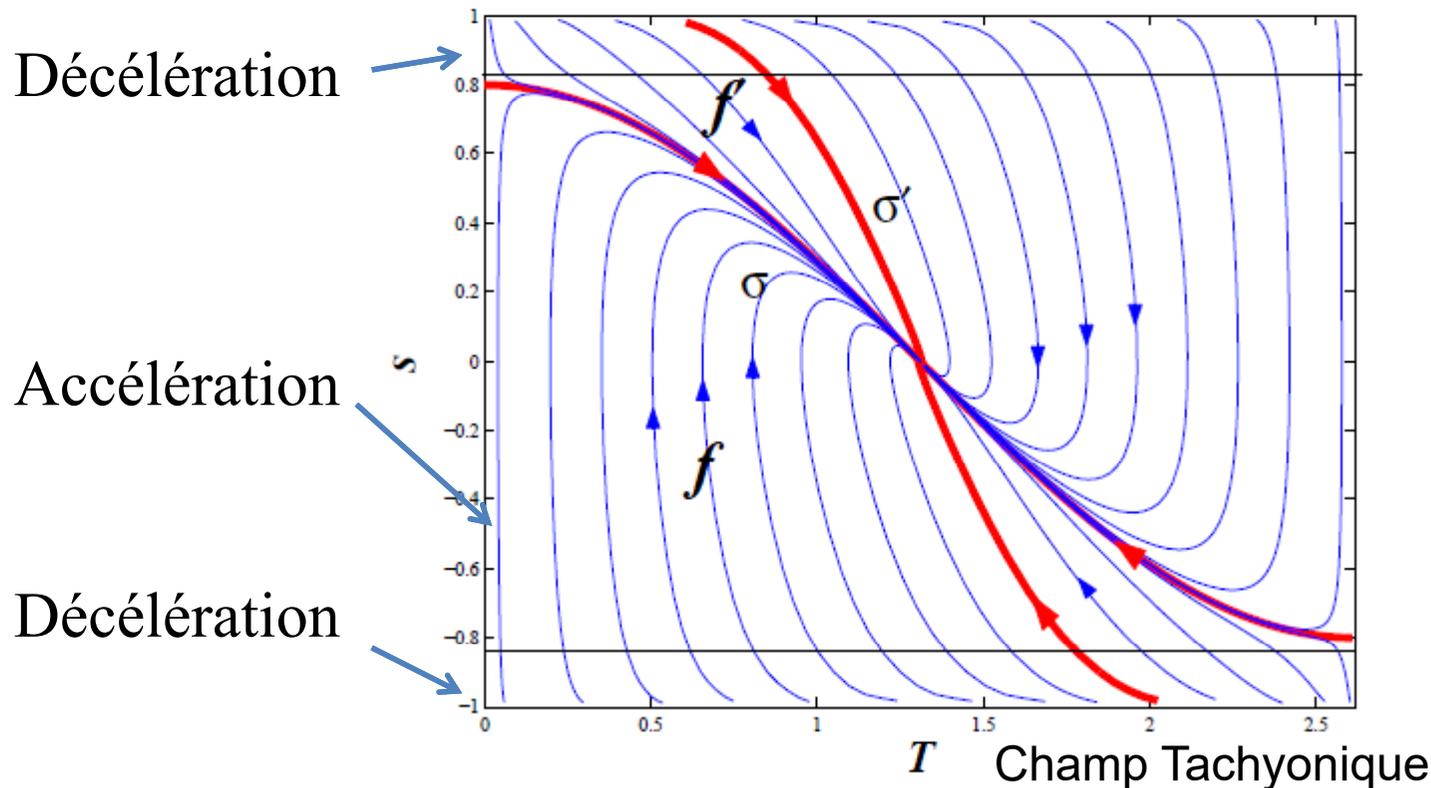
Certain modèles (*Gorini et al 2004*) élaborés de champ tachyonique permettent d'expliquer l'expansion accélérée, et finissent par un « Big Brake »  
→ Grande décélération



# Grande variété de comportement

Pour  $w < 0$ , le système passe par des phases d'accélération, puis de décélération.

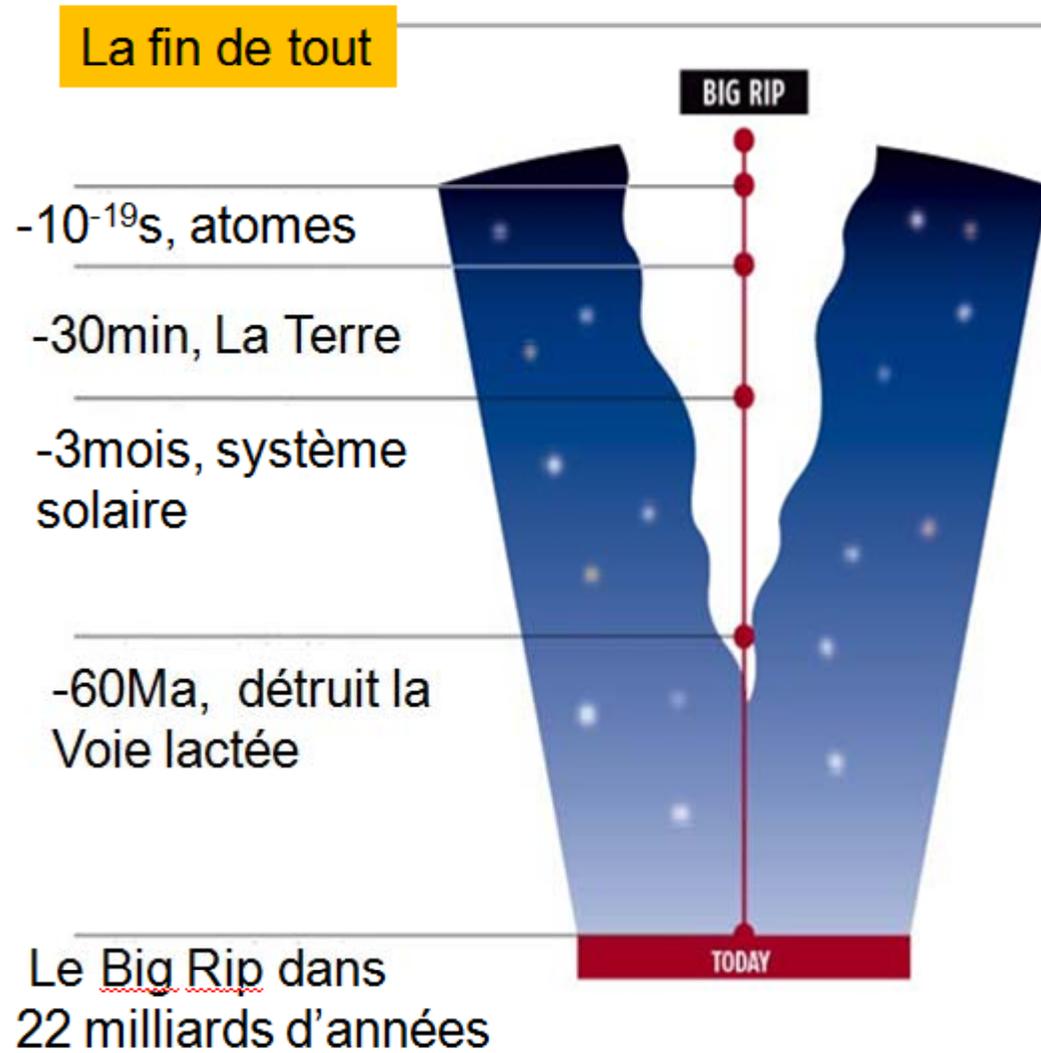
*Gorini et al 2004*



$$\ddot{a}(t_B) = -\infty, \dot{a}(t_B) = 0,$$

$$0 < a(t_B) < \infty$$

→ « Big Brake » Freinage brusque



# Conclusion

Une constante cosmologique est toujours possible

Mais la valeur de l'énergie du vide prédite est 60-120 ordres de grandeur supérieure aux observations

→ Mieux vaut la supposer nulle, et penser qu'il s'agit d'un champ scalaire, une quintessence avec une dynamique

→ Deux grands types de solution:

(1) dégel  $w=-1$  au départ, puis croît  $<-0.7$

(2) Congélation,  $w \rightarrow -1$ , avec solution tracker

Correspondent bien à des théories de supersymétrie, avec brisure

(1) Au pseudo-Nambu-Goldstone boson, ou théorie de super-gravité

→ Des expériences puissantes nécessaires pour départager