



Formation of structures in interacting Dark Energy cosmologies

Valeria Pettorino

Institute for Theoretical Physics, Heidelberg

Dipartimento di fisica, Federico II, Napoli, 19.12.08

Overview

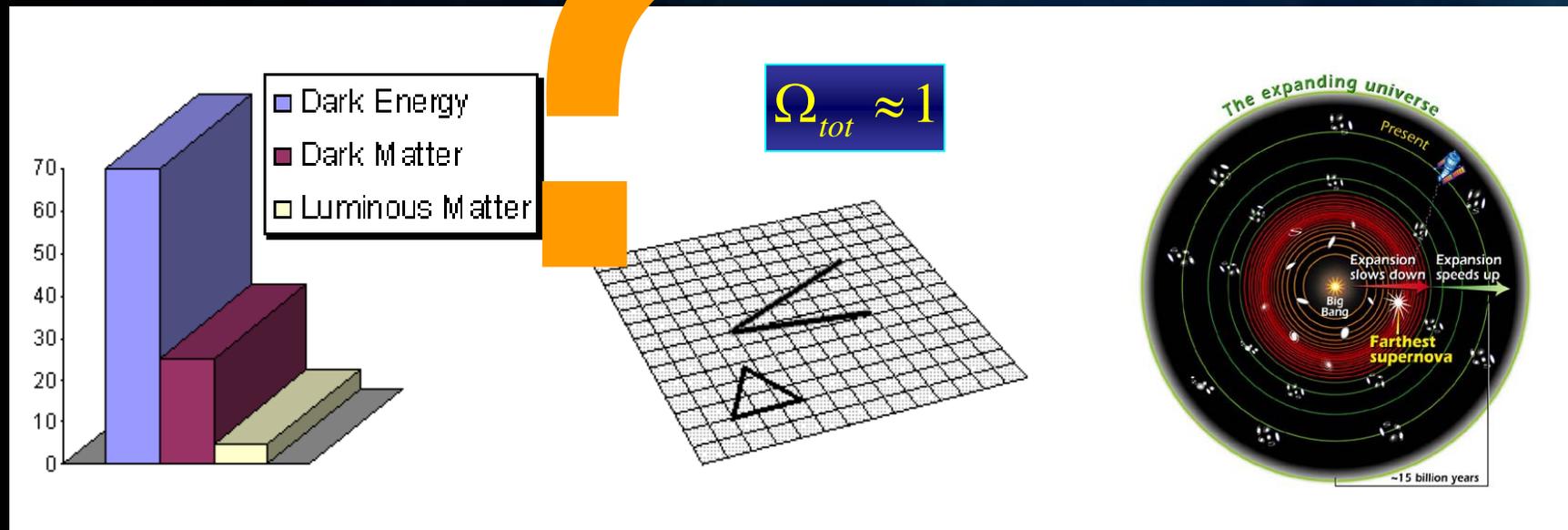
- Introduzione
- Dark energy ed interazione
 - Neutrini
 - Cold dark matter
- Conclusioni e progetti in corso



Dark

Flat

Accelerating

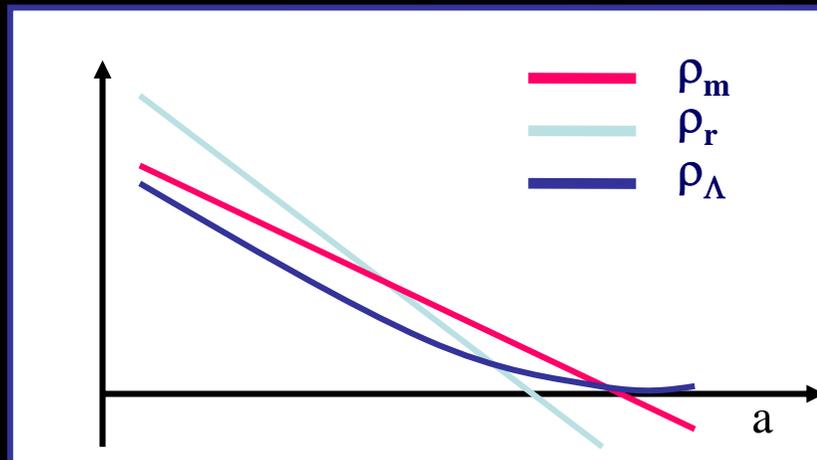


La dark matter clustera sotto l'effetto della forza di gravità, la dark energy si oppone alla gravità e causa un'espansione accelerata

Cos'è la Dark Energy?

Costante cosmologica

- dark matter non risente di alcuna interazione oltre alla gravità
- dark energy è costante e senza fluttuazioni



$$\rho_{\text{DE}}/M^4 \sim 6.5 \times 10^{-121}$$

$$\rho_{\text{m}}/M^4 \sim 3.5 \times 10^{-121}$$

$$M = 2.44 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

Perché così piccola?
Perché così importante proprio oggi?

Quintessenza

Wetterich 1988,
Ratra & Peebles 1988

Evoluzione di un campo scalare

Equazione del moto ed espansione

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -dV/d\phi$$

$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$

Dipendenza dal
potenziale $V(\phi)$



Attrattori

Steinhardt, Wang and Zlatev 1999,
Liddle & Scherrer 1999

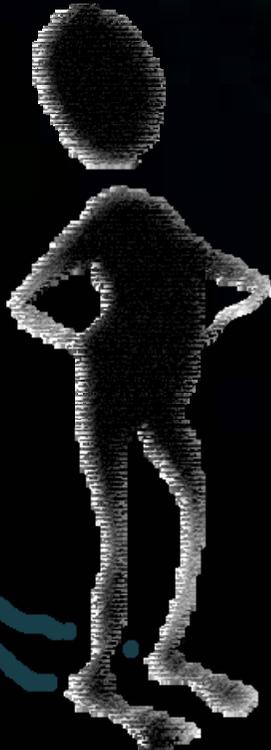
La dinamica è indipendente
dalle condizioni iniziali per ϕ e ϕ'

Esempi: $V(\phi) = M^4 \exp(-\alpha\phi/M)$
 $V(\phi_0) = V(\phi_0/\phi)^\alpha$

Interacting dark energy

Le difficoltà dei modelli di quintessenza e la mancanza di una spiegazione chiara al problema della dark energy hanno indotto ad affrontare il problema con un approccio diverso.

D
a
r
k
e
n
e
r
g
y



L'interazione fa sì che l'energia oscura e la materia con cui interagisce seguano un'evoluzione accoppiata che le mantiene 'vicine' anche in passato.

Le proprietà della DE sono legate alla materia con cui interagisce: un modo per affrontare il problema della coincidenza

Mangano, Miele, Pettorino 2003

Dark Energy accoppiata

- Coupling con la dark matter

[Wetterich 1995]

[Amendola 2000, 2004]

[Mangano Miele Pettorino 2005]

[Pettorino, Baccigalupi 2008]

[Quartin etal 2008]

[Bean etal 2008]

- Coupling con i neutrini

[Fardon etal 2004]

[Afshordi etal 2005]

[Brookfield etal 2007]

[Amendola etal 2007]

[Wetterich 2007]

[Mota, Pettorino, Robbers, Wetterich 2008]

Dark Energy e Dark Matter

- vincoli cosmologici
- l'accoppiamento può modificare l'evoluzione della DE e della DM
- effetti sulla formazione di strutture!

[M.Baldi, V.Pettorino, G.Robbers, V.Springel 2008]

Dark Energy e neutrini

- vincoli cosmologici
- coupling più grande che con la dark matter
- l'accoppiamento può modificare l'evoluzione della DE e (indirettamente) della DM
- effetti sulla formazione di strutture!

[D.Mota, V.Pettorino, G.Robbers, C.Wetterich 2008]

Dark energy e interazione

$$\nabla_\nu T_{(\alpha)\mu}^\nu = Q_{(\alpha)\mu}$$

Per un sistema a più componenti, il tensore energia impulso delle singole specie non è in generale conservato.

$$\sum_\alpha Q_{(\alpha)\mu} = 0$$

DE come campo scalare:

Il tensore energia impulso totale è conservato.

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\partial^\mu\phi\partial_\mu\phi - U(\phi) - m(\phi)\bar{\psi}\psi + \mathcal{L}_{kin}[\psi]$$

$$Q_{(\phi)\mu} = \frac{\partial \ln m(\phi)}{\partial \phi} (\rho - 3p) \partial_\mu \phi$$

Massa delle specie accoppiate è una funzione del campo di DE

In genere esponenziale con β parametro costante

$$m(\phi) = m_0 e^{-\beta(\phi)\frac{\phi}{M}}$$



Growing neutrino quintessence

Interazione con i neutrini

può avere effetti significativi in cosmologia e può essere naturalmente più grande dell'interazione con la DM

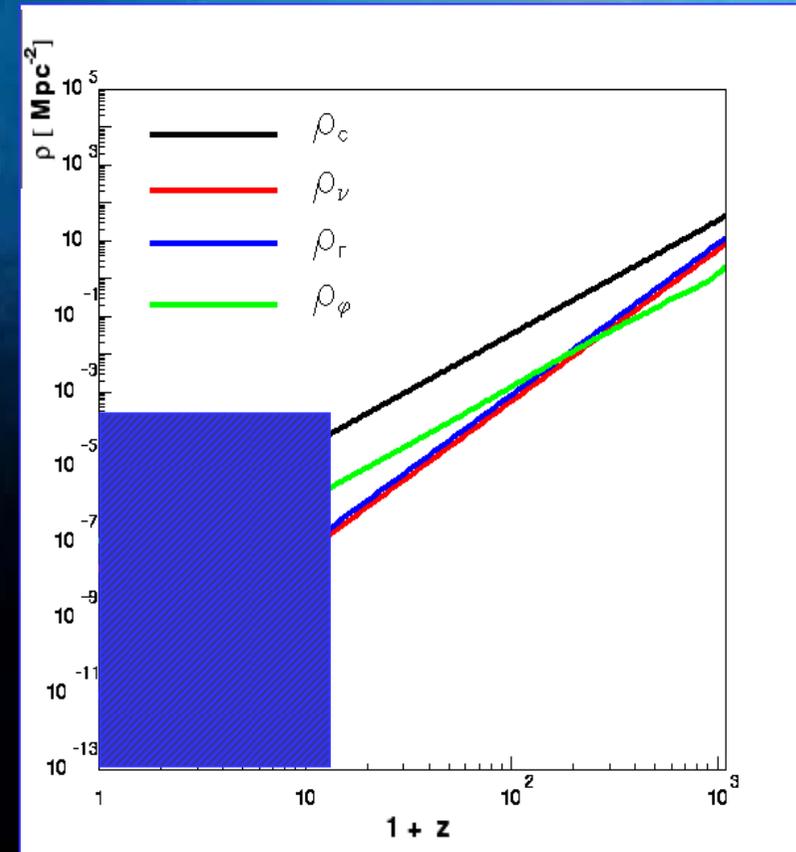


MAVANS: Fardon et al 2004, Afshordi et al 2005, Bjaelde et al 2008, Brookfield et al 2007, ...

Growing neutrinos: Amendola et al 2007, Wetterich 2007, Mota et al 2008, Brouzakis et al 2007

Potenziale esponenziale

- $V(\phi) = M^4 \exp(-\alpha\phi)$
- Soluzioni indipendenti dalle condizioni iniziali
- DE segue la componente dominante del background
- DE scala con una frazione costante
 $\Omega_\phi = n/\alpha^2$
con $n = 3(4)$ in MDE (RDE)



C'è bisogno di un evento cosmologico che segni la fine dell'epoca in cui la DE è sull'attrattore

Neutrini diventano non relativistici

Attrattore con frazione costante di DE + ~~coupling~~

$$\begin{aligned}\rho'_\phi &= -3\mathcal{H}(1+w_\phi)\rho_\phi + \beta(\phi)\phi'(1-3w_\nu)\rho_\nu \\ \rho'_\nu &= -3\mathcal{H}(1+w_\nu)\rho_\nu - \beta(\phi)\phi'(1-3w_\nu)\rho_\nu\end{aligned}$$

$$\phi'' + 2\mathcal{H}\phi' + a^2 \frac{dU}{d\phi} = a^2 \beta(\phi)(\rho_\nu - 3p_\nu)$$

$$\beta(\phi) \equiv -\frac{d \ln m_\nu}{d\phi}$$

$$m_\nu = \bar{m}_\nu e^{-\tilde{\beta}(\phi)\phi}$$

La massa dei neutrini cresce ($\beta < 0$)

I neutrini diventano non relativistici

Neutrini diventano non relativistici

Attractor with constant fraction of DE + coupling

$$\begin{aligned}\rho'_\phi &= -3\mathcal{H}(1+w_\phi)\rho_\phi + \beta(\phi)\phi'(1-3w_\nu)\rho_\nu \\ \rho'_\nu &= -3\mathcal{H}(1+w_\nu)\rho_\nu - \beta(\phi)\phi'(1-3w_\nu)\rho_\nu\end{aligned}$$

$$\phi'' + 2\mathcal{H}\phi' + a^2 \frac{dU}{d\phi} = a^2 \beta(\phi)(\rho_\nu - 3p_\nu)$$



La massa dei neutrini cresce ($\beta < 0$)



I neutrini diventano non relativistici

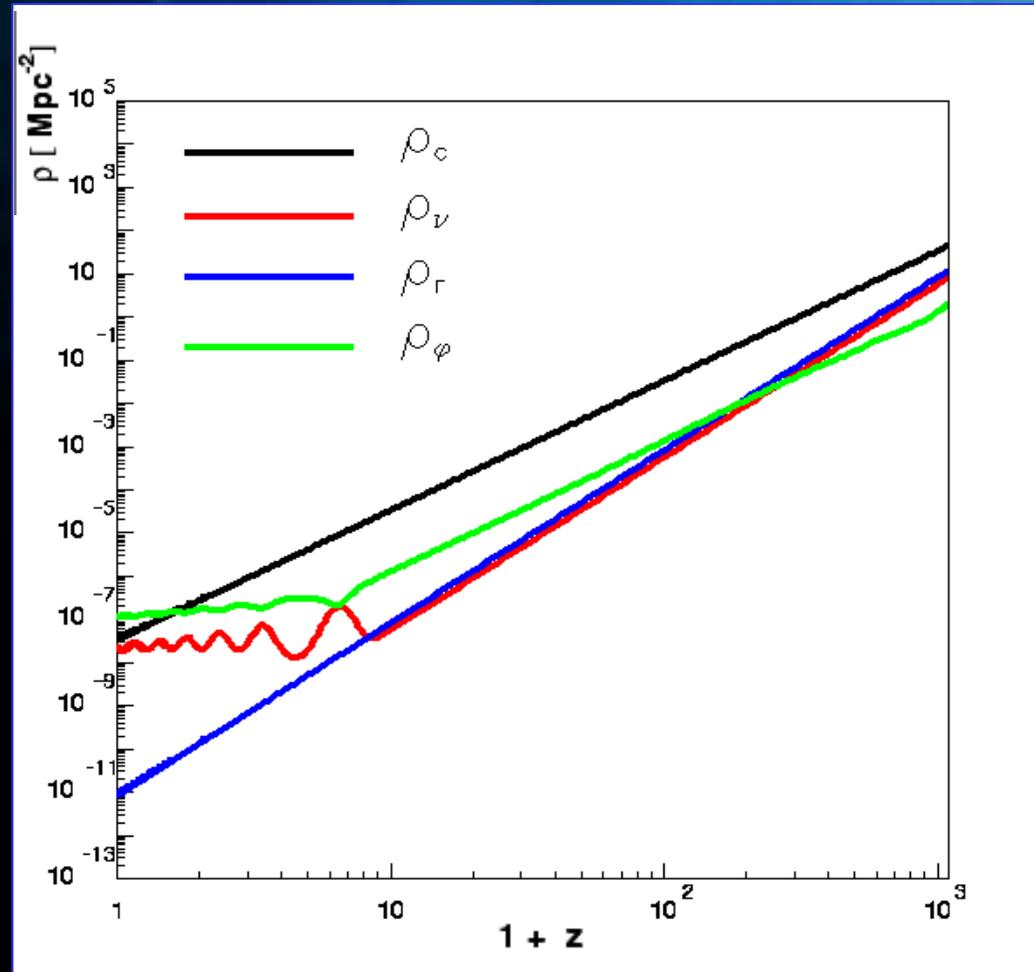


L'accoppiamento con la DE si attiva e ferma ϕ



Accelerazione

Effetto del coupling



Dark energy - neutrino connection

- Le proprietà della Dark energy e dei neutrini sono collegate

$$\Omega_h(t_0) \approx \frac{\gamma m_\nu(t_0)}{16eV}$$

$$\gamma = -\frac{\beta}{\alpha}$$

Equazione di stato del fluido DE- ν

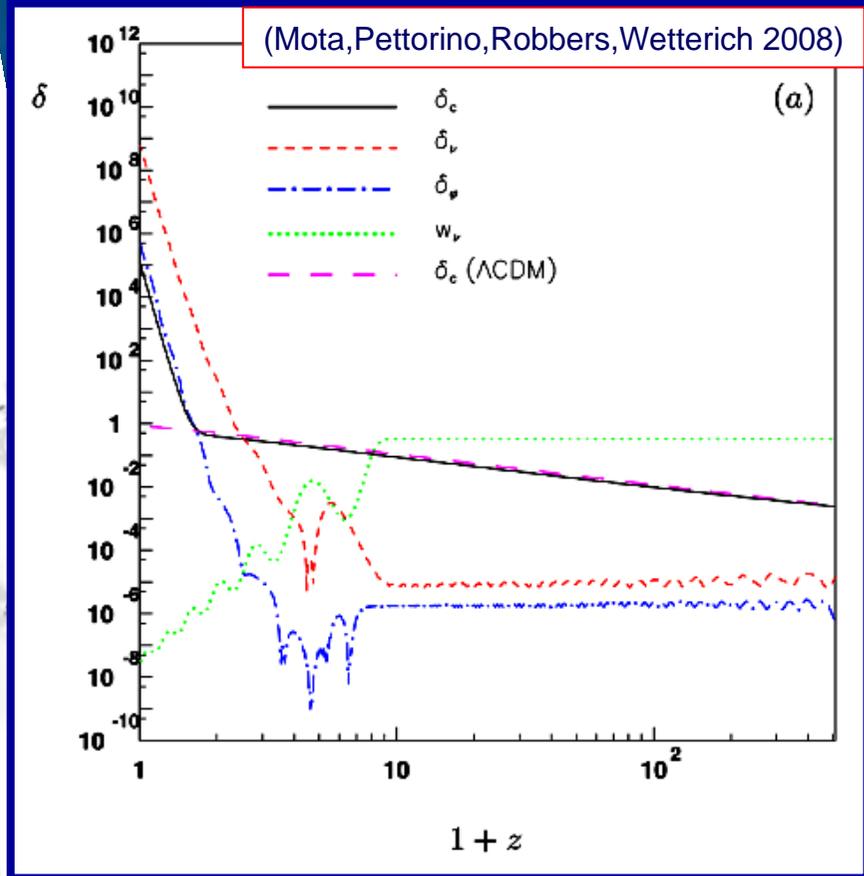
La quantità di DE in epoca presente è determinata da un evento cosmologico

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

Perturbazioni lineari

Implement CMBEASY, CAMB...

$$\delta'_\phi = 3\mathcal{H}(w_\phi - c_\phi^2)\delta_\phi - \beta(\phi)\phi' \frac{\rho_\nu}{\rho_\phi} [(1 - 3w_\nu)\delta_\phi - (1 - 3c_\nu^2)\delta_\nu] - (1 + w_\phi)(kv_\phi + \frac{\rho_\nu}{\rho_\phi}(1 - 3w_\nu) v'_\nu) - \mathcal{H}(1 - 3w_\phi)v_\phi - \beta(\phi)\phi'(1 - 3w_\nu) \frac{w'_\phi}{1 + w_\phi} v_\phi + kc_\phi^2 \frac{\delta_\phi}{1 + w_\phi} + k\Psi - \frac{2}{3} \frac{w_\phi}{1 + w_\phi} k\pi T_\phi + k\beta(\phi)\delta\phi \frac{\rho_\nu}{\rho_\phi} \frac{1 - 3w_\nu}{1 + w_\phi} v'_\nu = (1 - 3w_\nu)(\beta(\phi)\phi' - \mathcal{H})v_\nu - \frac{w'_\nu}{1 + w_\nu} v_\nu + kc_\nu^2 \frac{\delta_\nu}{1 + w_\nu} + k\Psi - \frac{2}{3} k \frac{w_\nu}{1 + w_\nu} \pi T_\nu - k\beta(\phi)\delta\phi \frac{1 - 3w_\nu}{1 + w_\nu}$$

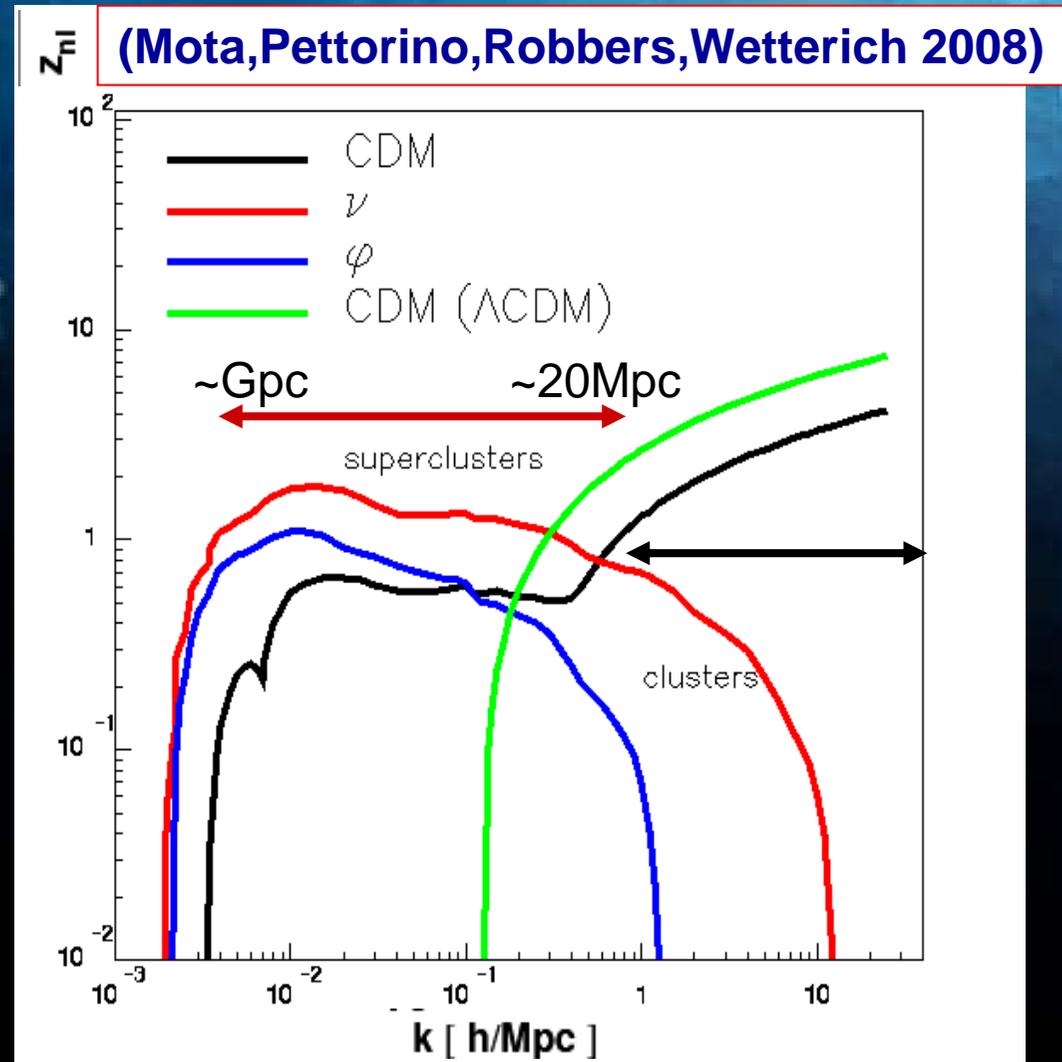


$k = 0.1 \text{ h/Mpc}$

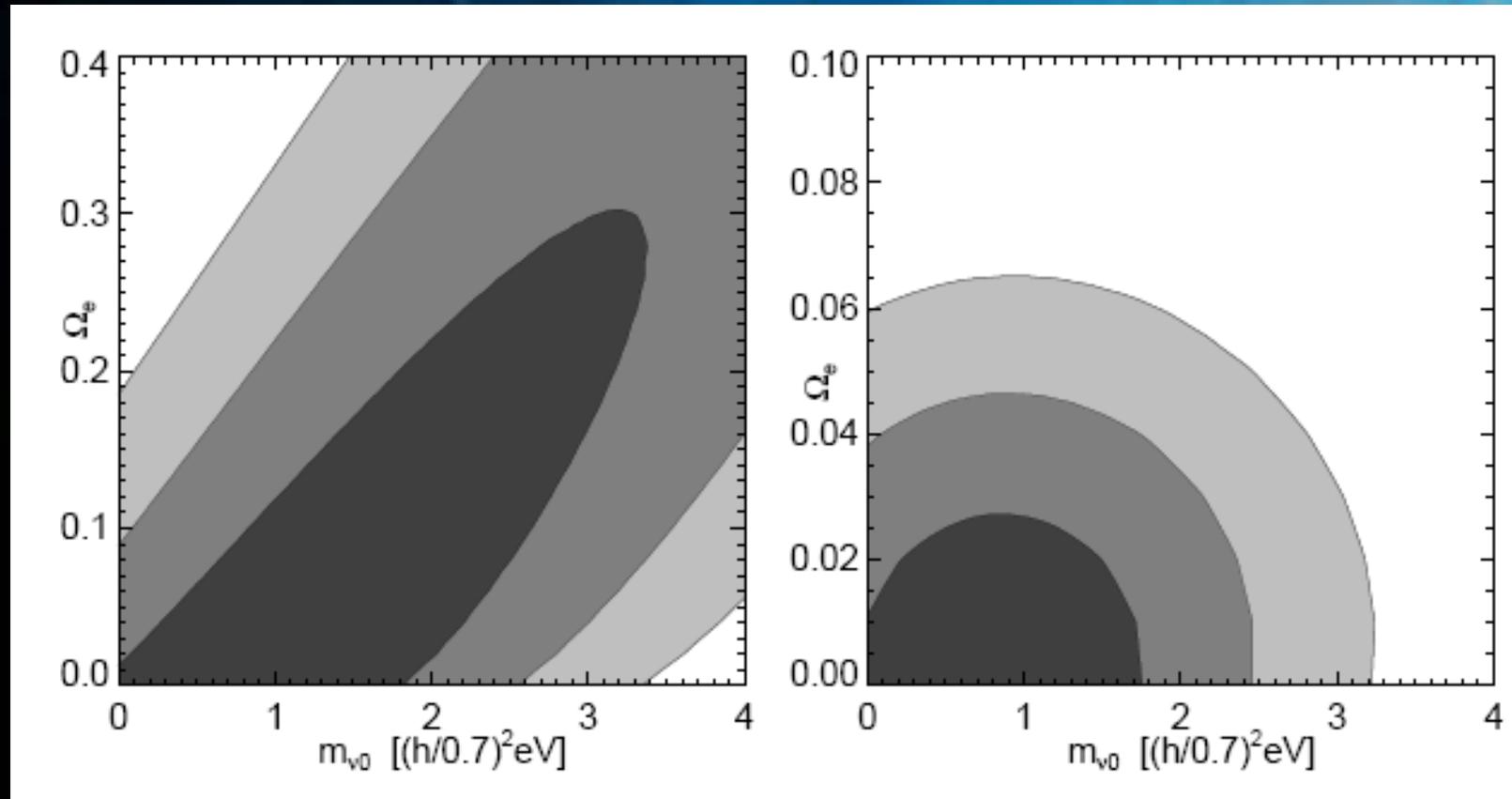
Neutrino clustering

- I neutrini formano strutture su larga scala: diventano non lineari a $z \sim 1$
- A piccole scale i neutrini riducono le strutture di CDM
- Strutture stabili: neutrino lumps/nuggets

Afshordi et al 2005
Brouzakis et al 2007



Supernovae constraints



Rubin et al 2008

Conclusioni per DE - neutrini

- Quando i neutrini diventano non relativistici, il coupling comincia ad avere effetto.
- Transizione dall'attrattore ad una DE quasi statica.
- A grandi scale, i neutrinos sono i primi a clusterare, a $z \sim 1$.
- A piccole scale, i neutrini non clusterano ma indirettamente riducono la formazione di strutture di CDM.
- L'osservazione di una popolazione di strutture su grandi scale o la correlazione con la CMB possono essere indicazione di una nuova forza attrattiva che agisce su scale cosmologiche più forte della gravità.

D
a
r
k
e
n
e
r
g
y



Coupled quintessence

D
a
r
k
m
a
t
t
e
r



Coupled
quintessence

=

quintessence

+

cdm (only)

D
a
r
k
e
n
e
r
g
y



D
a
r
k
m
a
t
t
e
r



Background

Consideriamo la dark energy come un campo scalare (quintessenza)

$$\rho_\phi = \frac{\dot{\phi}^2}{2a^2} + V(\phi)$$

[Ratra and Peebles 1988]

[Wetterich 1988]

accoppiato ad una specie la cui massa è funzione di ϕ

$$m_c = \bar{m} e^{-\tilde{\beta}\phi}$$

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2\kappa} R - \frac{1}{2} \phi^{;\mu} \phi_{;\mu} - U(\phi) - m(\phi) \bar{\psi} \psi + \mathcal{L}_{\text{kin},\psi} \right]$$

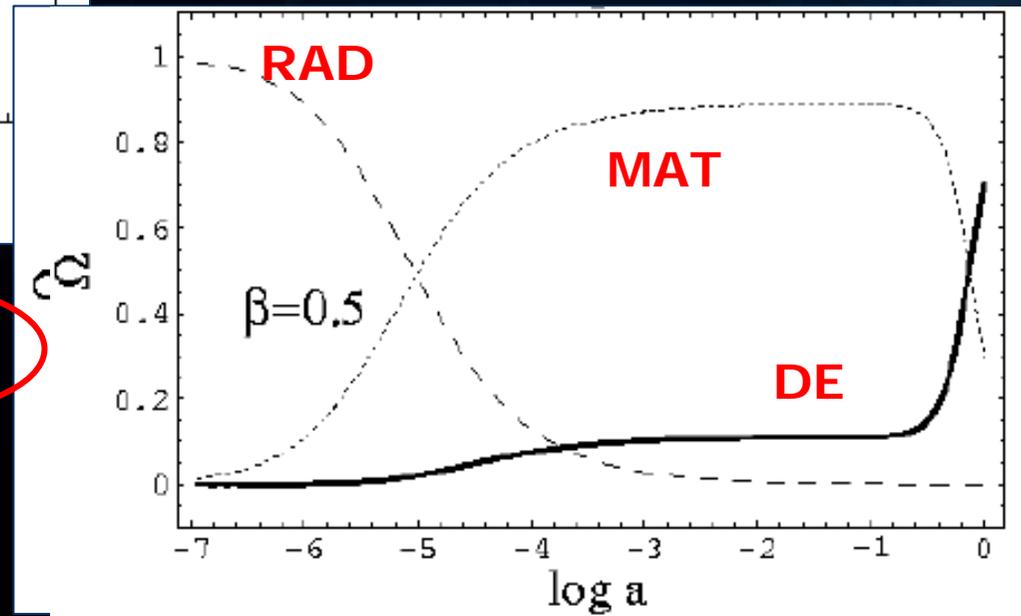
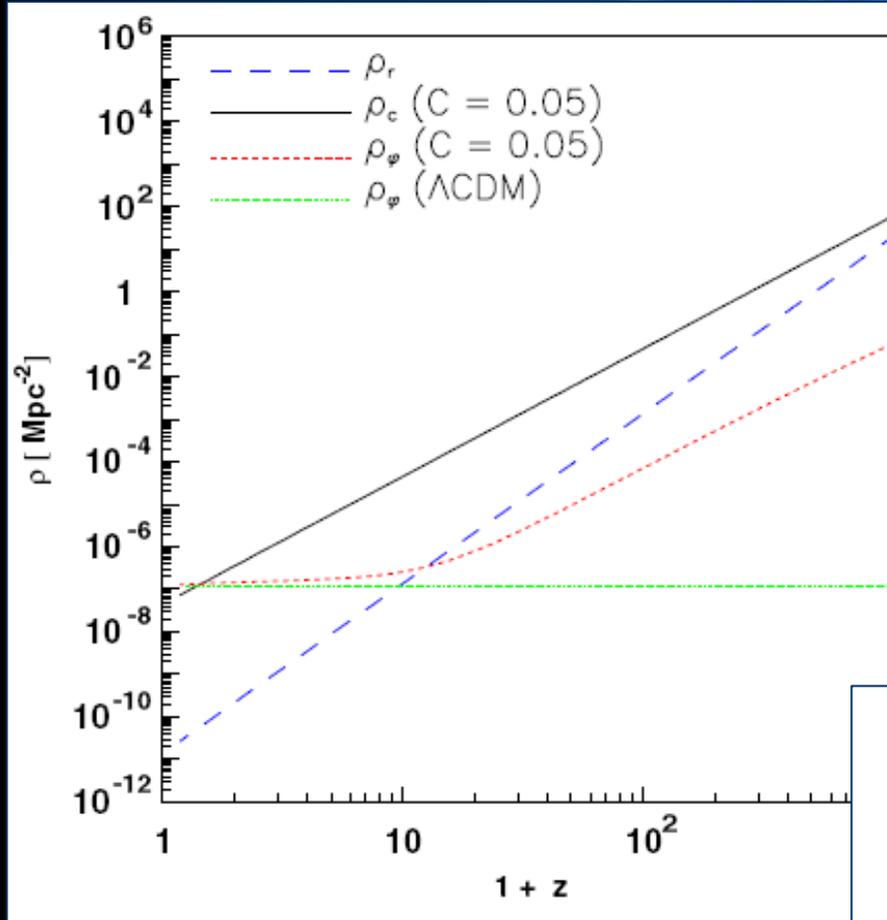
$$\beta(\phi) \equiv -\frac{d \ln m_c}{d\phi}$$

[Wetterich 1995]

[Amendola 2000, 2004]

[Mangano, Miele, Pettorino 2005]

Dark energy non trascurabile in passato



$$\rho'_\phi = -3\mathcal{H}(1 + w_\phi)\rho_\phi + \beta(\phi)\phi'\rho_c$$

$$\rho'_c = -3\mathcal{H}\rho_c - \beta(\phi)\phi'\rho_c$$

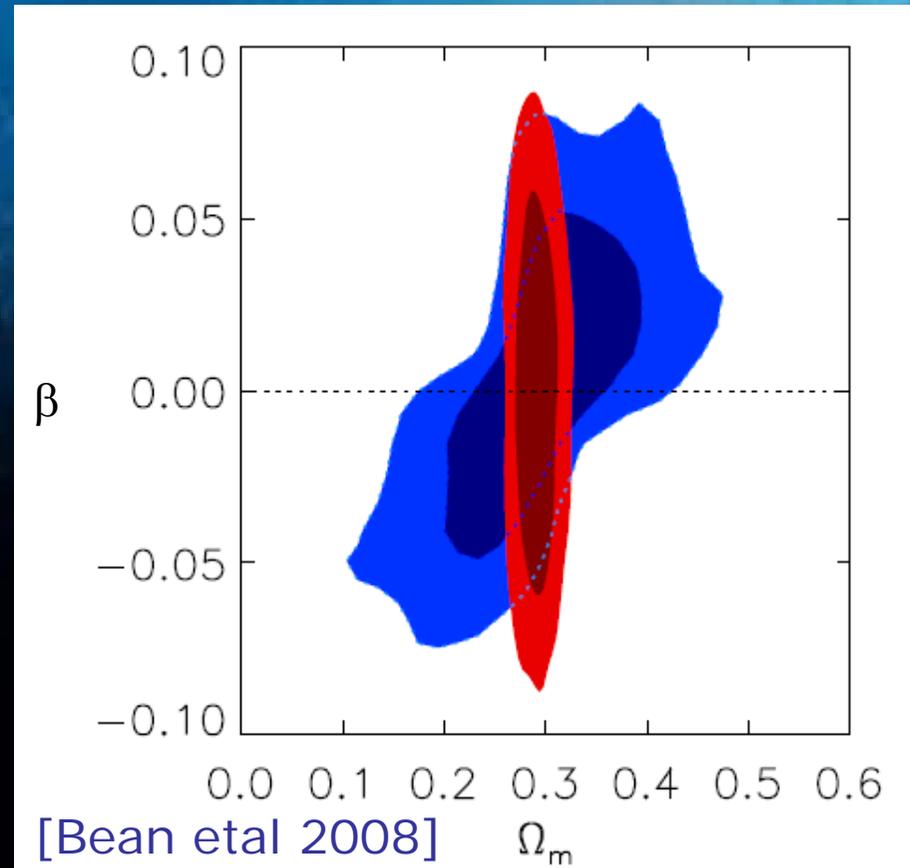
Perturbazioni lineari

$$\begin{aligned}\delta\rho'_\phi + 3\mathcal{H}(\delta\rho_\phi + \delta p_\phi) + kh_\phi v_\phi + 3h_\phi\Phi' &= \frac{\beta(\phi)}{M}\rho_c\delta\phi' + \frac{\beta(\phi)}{M}\phi'\delta\rho_c + \frac{\beta_{,\phi}}{M}\phi'\delta\phi\rho_c \\ \delta\rho'_c + 3\mathcal{H}\delta\rho_c + k\rho_c v_c + 3\rho_c\Phi' &= -\frac{\beta(\phi)}{M}\rho_c\delta\phi' - \frac{\beta(\phi)}{M}\phi'\delta\rho_c - \frac{\beta_{,\phi}}{M}\phi'\delta\phi\rho_c \\ h_\phi v'_\phi + (h'_\phi + 4\mathcal{H}h_\phi)v_\phi - k\delta p_\phi - kh_\phi\Psi &= k\frac{\beta(\phi)}{M}\rho_c\delta\phi \\ v'_c + \left(\mathcal{H} - \frac{\beta(\phi)}{M}\phi'\right)v_c - k\Psi &= -k\frac{\beta(\phi)}{M}\delta\phi\end{aligned}$$

CMB constraints

Constraints dalla
CMB: $\beta < 0.1$ (per
un accoppiamento
costante)

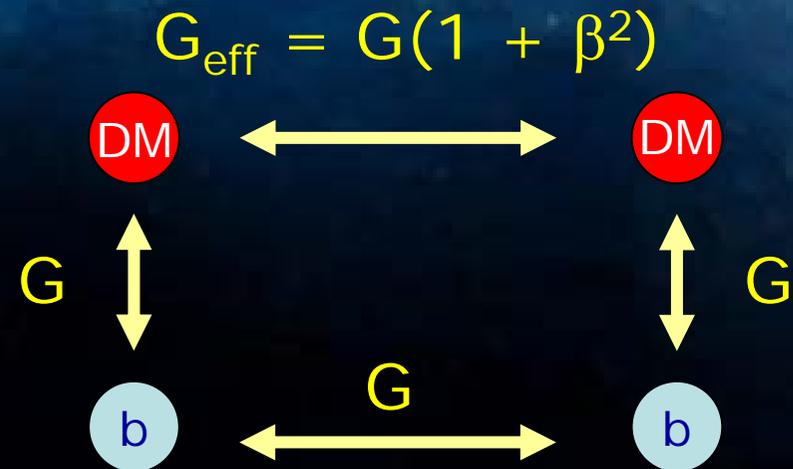
[Bean et al 2008] 



Ricetta per codici N-body

Nuova interazione fra particelle CDM: interazione mediata dal campo scalare di quintessenza.

1. **Interazione gravitazionale** efficace tra particelle di DM
2. La **massa** delle particelle di DM varia
3. Nuovo termine di **frizione**



$$\delta_c'' + (\mathcal{H} - \beta\phi')\delta_c' - \frac{3}{2}\mathcal{H}^2 \left[(1 + 2\beta^2)\Omega_c\delta_c + \Omega_b\delta_b \right] = 0$$

Nbody simulations for CQ

M. Baldi, V. Pettorino, G. Robbers, V. Springel 2008

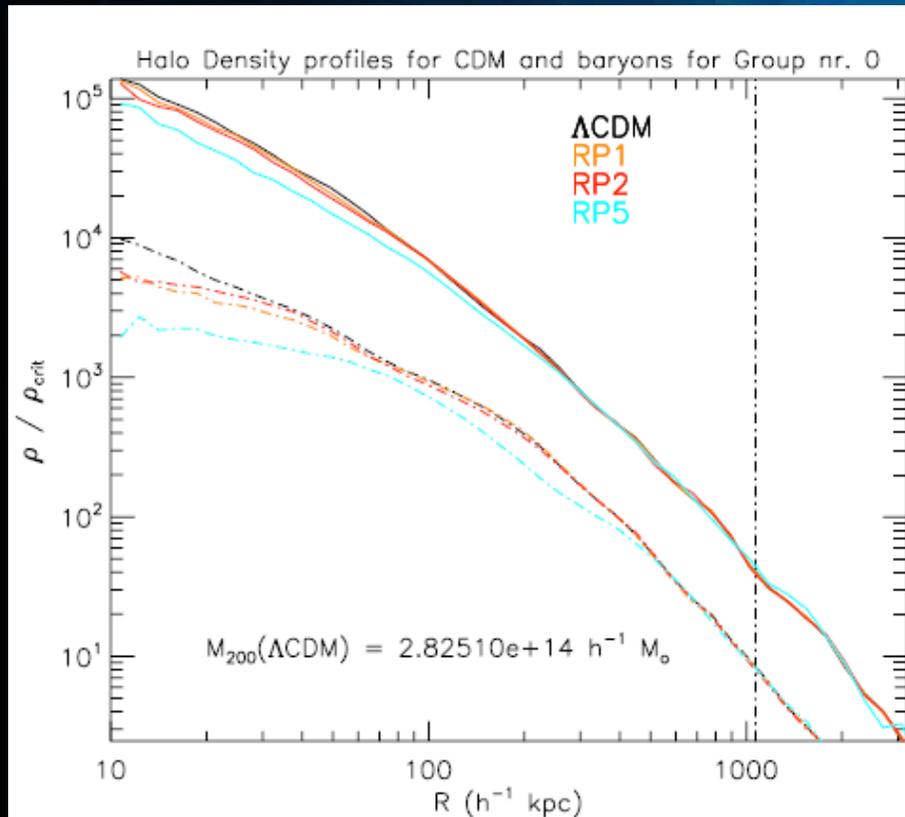
$L_{\text{box}} = 80 h^{-1} \text{Mpc}$	$m_c(z=0) \sim 2 \cdot 10^8 h^{-1} M_{\odot}$
$N = 2 \times 512^3$	$m_b \sim 5 \cdot 10^7 h^{-1} M_{\odot}$
$\epsilon_g = 3.5 h^{-1} \text{kpc}$	$z_i = 60$

Implementazione generale di GADGET

[V. Springel 2005]

- Profili di densità meno piccati
- Concentrazione degli aloni di DM più bassa
- Bias tra barioni e cdm

Profili di densità

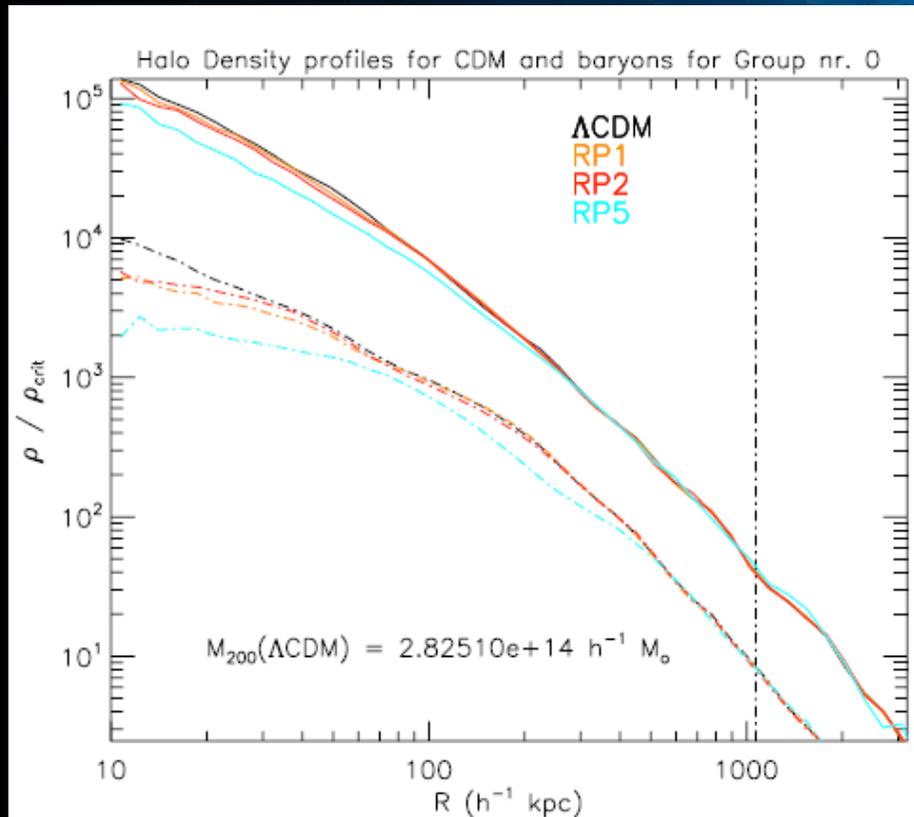


La densità interna dell'alone decresce all'aumentare del coupling, sia per cdm che per i barioni

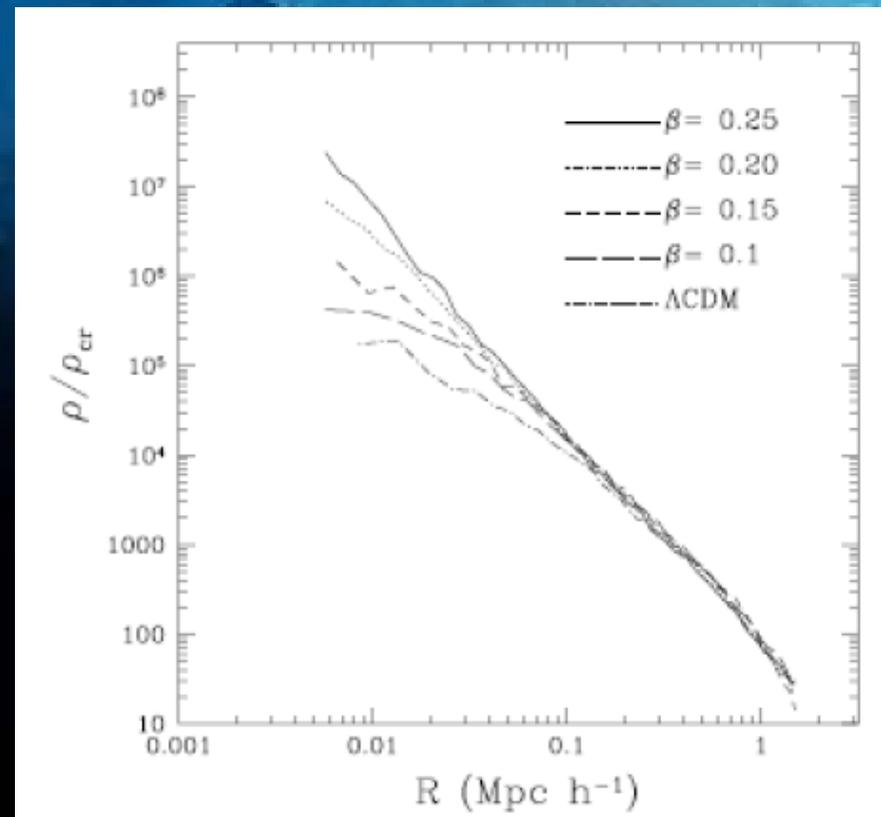
Risultati in contrasto con Macciò et al 2004

Baldi Pettorino Robbers Springel 2008

Profili di densità



Baldi Pettorino Robbers Springel 2008



Macciò et al 2004

Conclusioni per Quintessence - CDM

- L'interazione mantiene DE and DM vicine
- Attractor solutions
- Constrains by CMB
- Tre principali modifiche implementate nel codice Nbody:
 - costante gravitazionale più grande, sentita dalle particelle DM
 - massa delle DM che varia
 - nuovo termine di frizione aggiuntivo, nella direzione della velocità
- Tre risultati principali:
 - profili di densità meno piccati, concentrazioni più basse, bias

Prospettive future

- Non linear features of interacting dark energy models
- Data analysis of N-body simulations
- Cross correlation with CMB
- Applicazioni e previsioni per le future missioni di dark energy



NASA JOINT DARK ENERGY MISSION
Beyond Einstein Program

ESA Cosmic Vision Program