

EMPREINTE DE L'ÉNERGIE NOIRE SUR LA FORMATION DES STRUCTURES.

CONSORTIUM DEUS (DARK ENERGY UNIVERSE SIMULATION)

WWW.DEUS-CONSORTIUM.ORG

1^{er} Février 2010
CPPM, Marseille
J.-M. ALIMI

V. Boucher, P.-S. Corasaniti, J. Courtin, A. Fuzfa, Y. Rasera,, ...
AIP Conf.Proc.861:858-866, 2006 **arXiv:astro-ph/0611284**,
M.N.R.A.S. 401:775,2010, arxiv:0903.5490,
arxiv:1001.3425

L'Énergie Noire (Origine de l'accélération récente de notre Univers): Un des principaux défis de la (Astro)Physique:

- De nombreuses observations cosmologiques établissent que l'expansion récente de notre Univers est accélérée.
- L'énergie noire questionne les principes fondamentaux de la cosmologie et peut-être au-delà.
- Quelle est la cause de cette accélération ? (Observation / Théorie / Simulation Numérique)
- Qu'est ce que cette accélération nous enseigne, et quelles nouvelles questions fait-elle émerger ? Comment la question de la structuration de notre univers en est elle affectée ?

Plan

■ L'accélération cosmique:

- « Evidences » Observationnelles.
- Interprétations Théoriques.
 - Pourquoi l'énergie noire ne peut être simplement une constante cosmologique ?,
mécanisme cosmologique: la quintessence

■ Energie Noire - Formation des Structures – Simulation Numérique

■ Modèle de quintessence « réaliste »

- Définition, évolution linéaire
- Évolution non-linéaire ... la formation des structures comme signature de l'énergie noire.

■ Modèle de quintessence « générique »

- Definition et Non-Universalité de la fonction de masse ...

■ Le Consortium DEUS (Dark Energy Universe Simulation).

- résultats et objectifs, synergie des expertises
- « reconstruction »

Une cosmologie de précision.

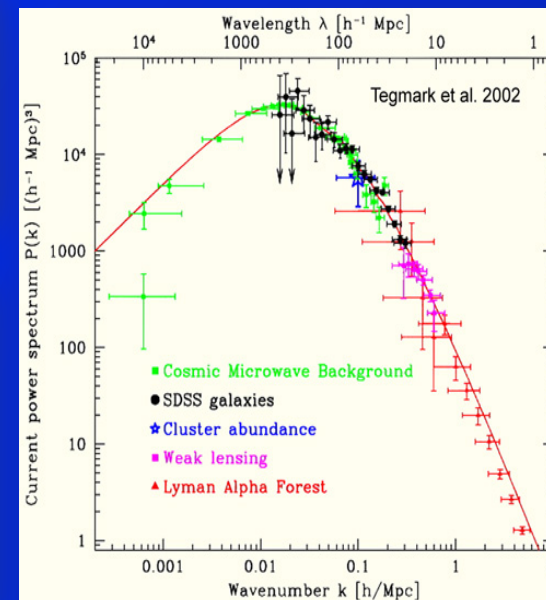
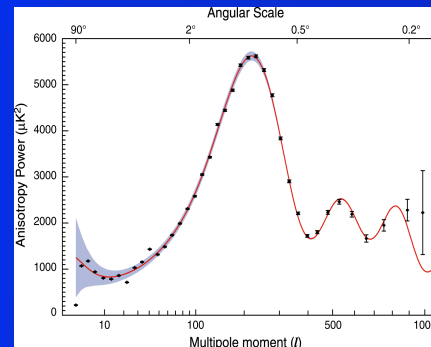
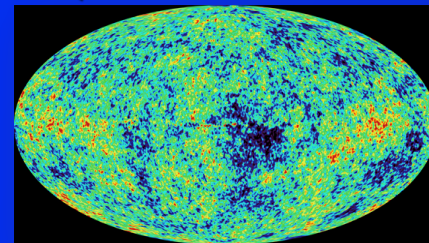
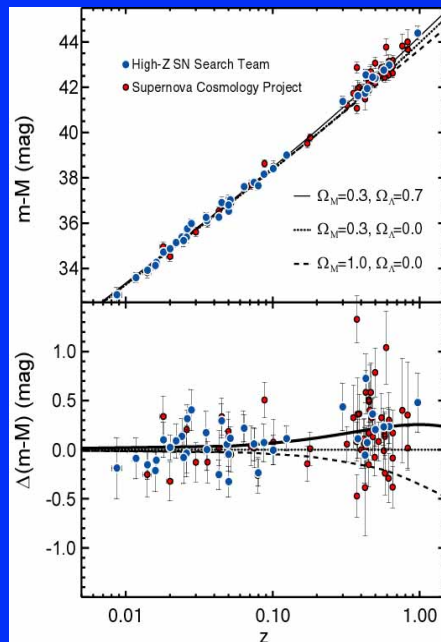
Quelques projets... passé, présent et ... futur ...



Accélération Cosmique: “évidences” observationnelles

Observations: (Sondes primaires (SN, WL, BAO) Sondes secondaires (Clusters, Effet SW, Distortion en z...)

- SN Ia luminosity distance (SCP,HST,SNLS,ESSENCE)
- CMB anisotropy power spectra (WMAP)
- Matter power spectrum (from 2dF and SDSS)
- BAO (detected in 2dF and SDSS)
- ISW-correlation (several galaxy surveys vs. WMAP)
- Cluster Number Counts (Chandra detections) ...



Quelques remarques...

Accélération Cosmique: Évidences Observationnelles

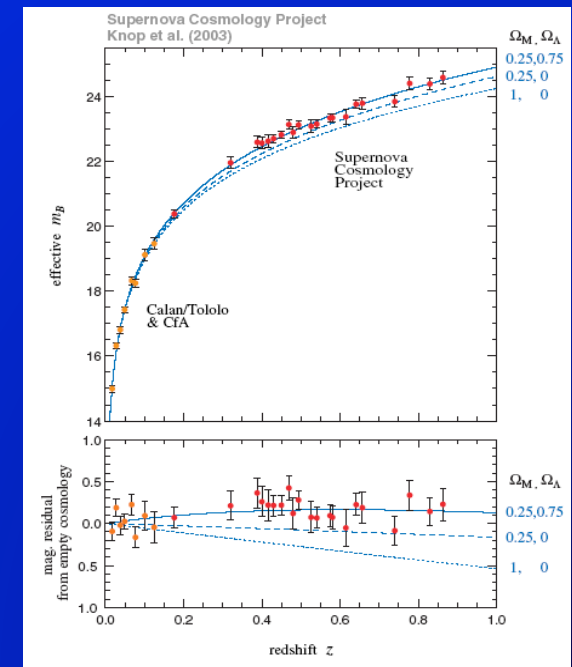
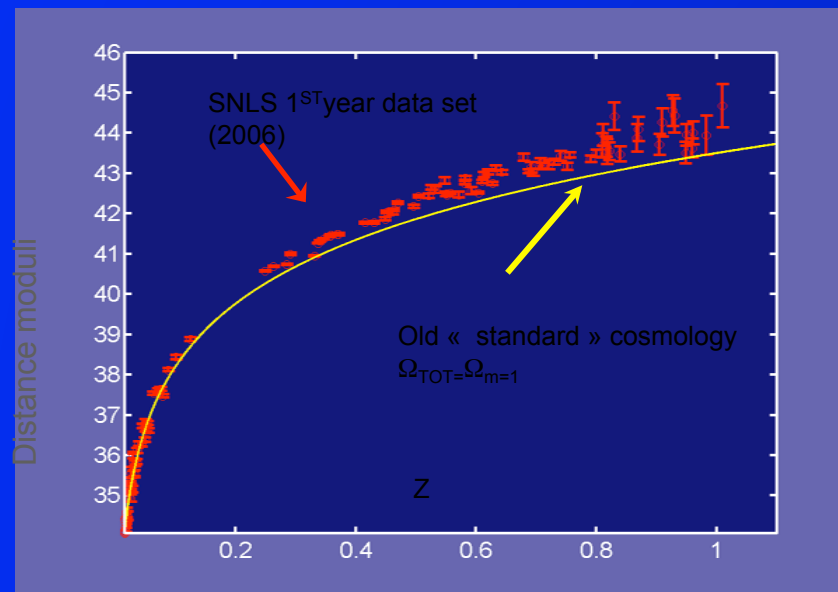
Les Supernovae de Type Ia apparaissent plus faiblement lumineuses qu'attendues.

- 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

1998

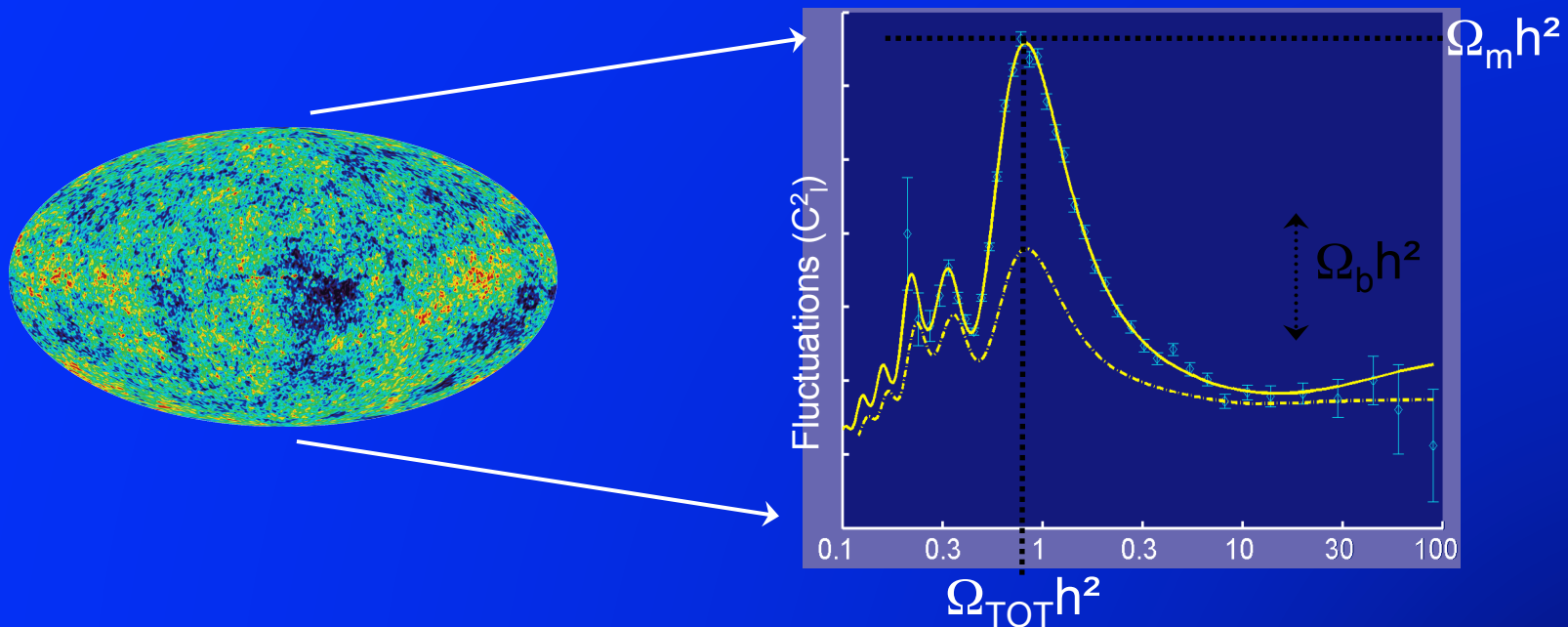
Annus Mirabilis



Accélération Cosmique: Évidences Observationnelles

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

- L'analyse des anisotropies du fond de rayonnement cosmologique à $T=2.725\pm0.002$ K est un puissant outil pour déterminer les paramètres cosmologiques.



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

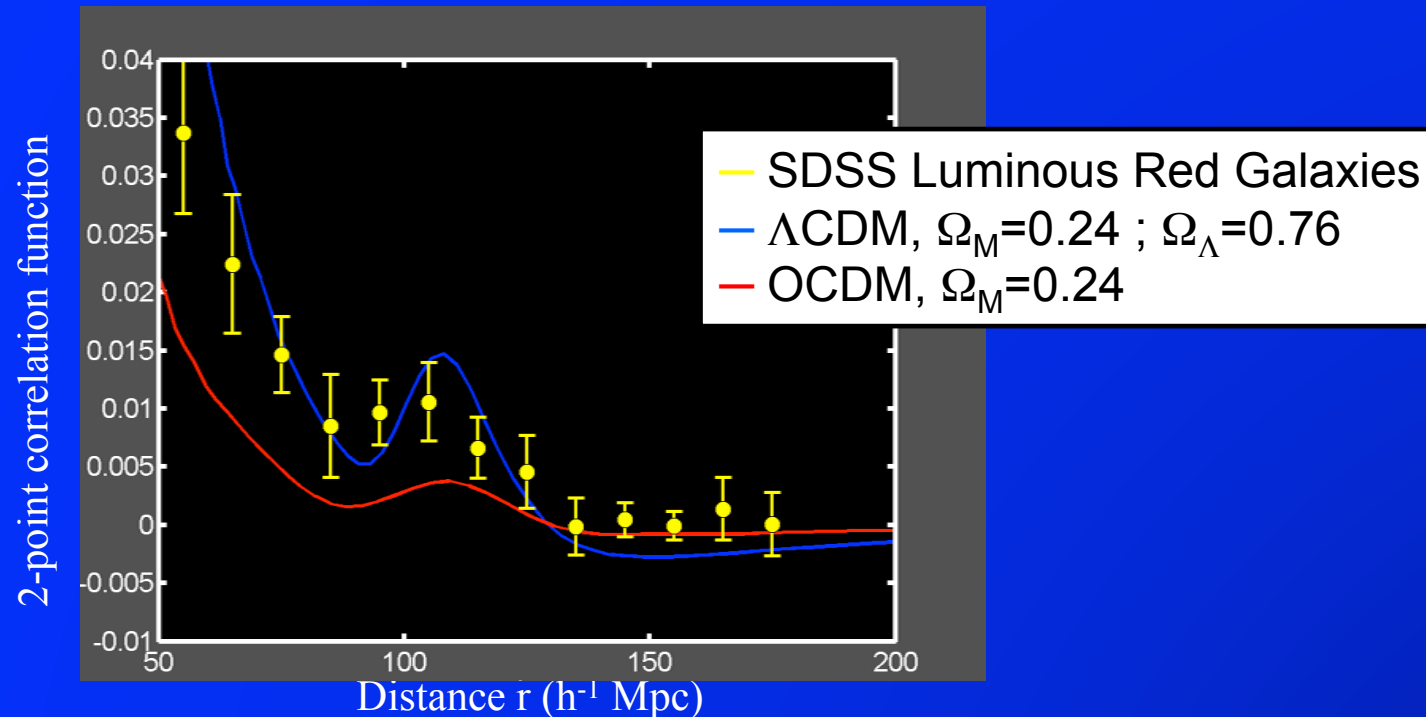
Contenu Présent de l'Univers: Matière : $\sim 30\%$ avec Baryons: $\sim 5\%$

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

Accélération Cosmique: Évidences Observationnelles

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

- BAO



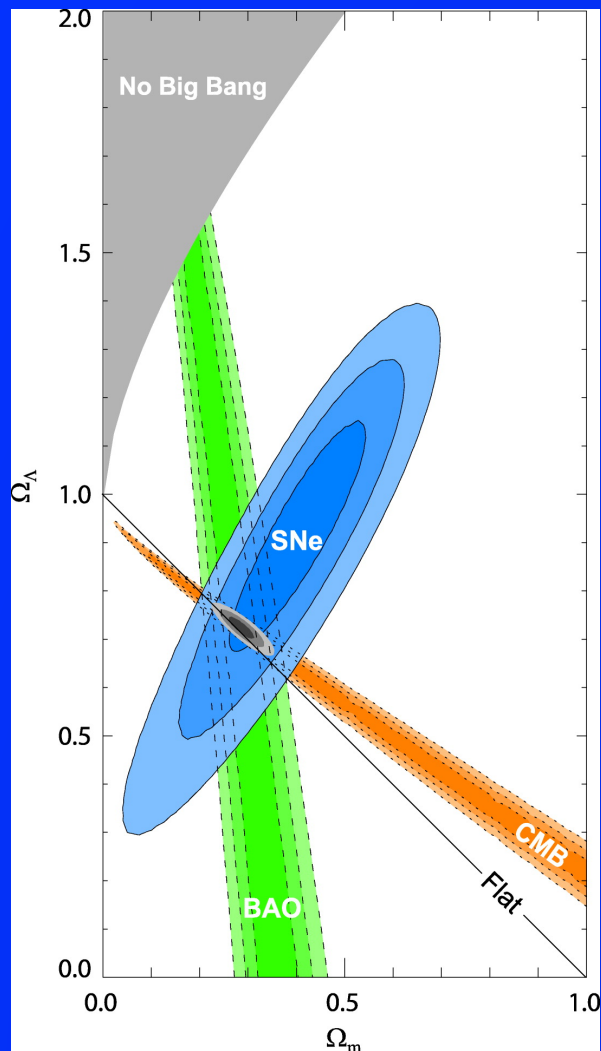
- Large-Scale distribution of galaxies (Power Spectrum)

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 $\Omega_M \sim 0.3$

Nature de l'énergie noire ?

Complémentarité Cosmique



Kowalski et al. 2008

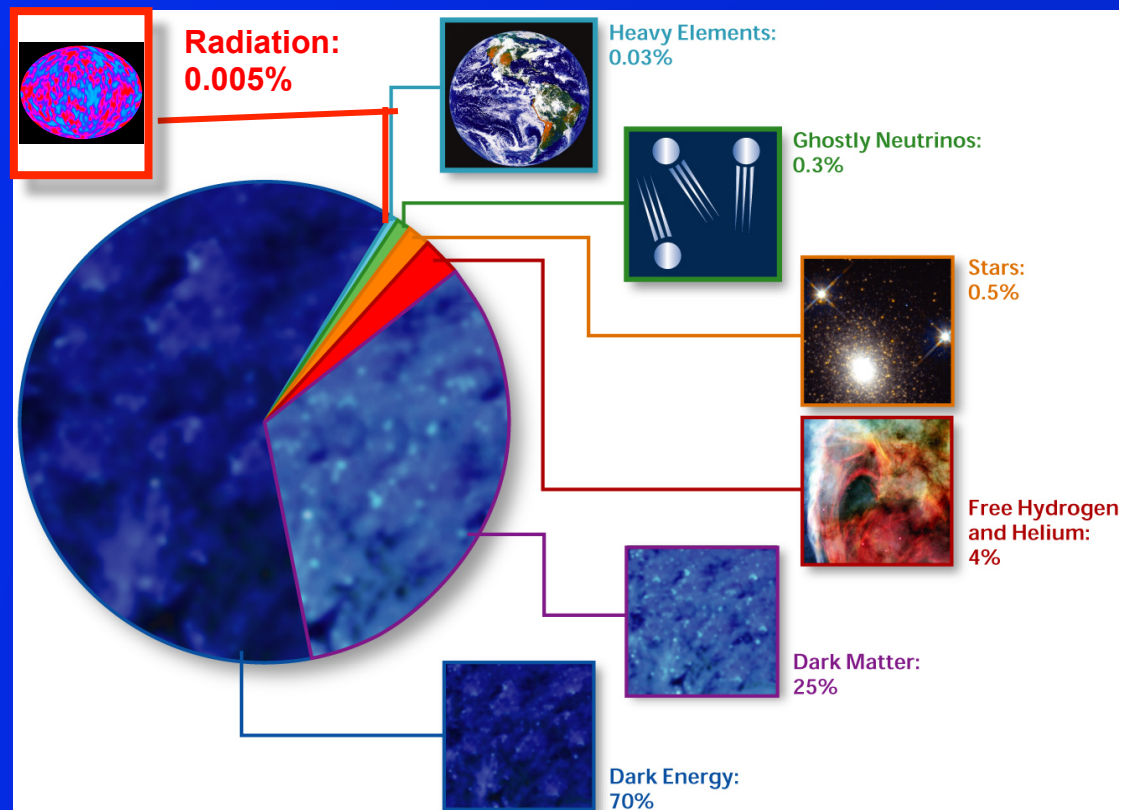
Univers Invisible

DM:

$$\Omega_m = 0.23 \pm 0.03$$

DE:

$$\Omega_{DE} = 0.73 \pm 0.03$$



Nature de l'énergie noire, origine de l'accélération cosmique ?

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 Géomé-
trique de l'énergie
noire

Nombreux modèles dégénérés sur la dynamique globale de l'Univers (SN), et sur
la dynamique perturbée (CMB)

Nature de l'Energie 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 ?

- $P_\Lambda = -\rho_\Lambda$ ($w = -1$)

- Energie 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 !

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

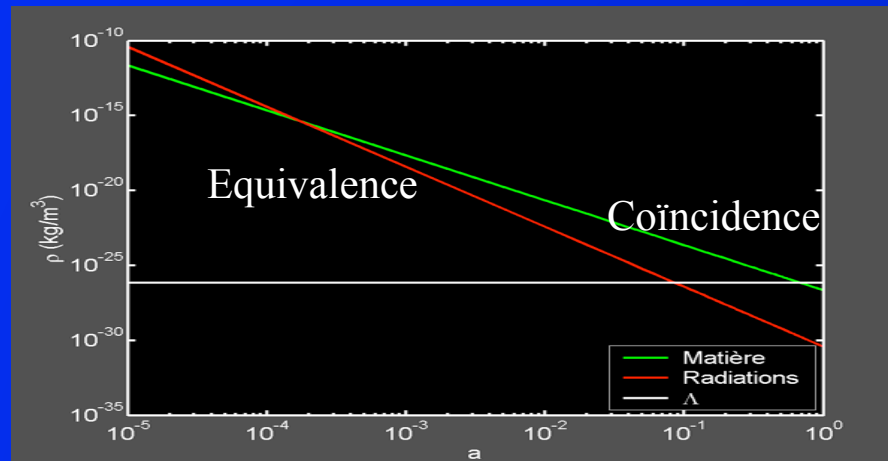
$$\rho_\Lambda^{obs} \approx \rho_{c,0} \approx 10^{-47} \text{ GeV}^4$$

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

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

Le problème de la coïncidence !

- $\rho_{\Lambda}^{\text{obs}}$ 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: $w(z)$

Nature de l'énergie noire: Quintessence et autres extensions

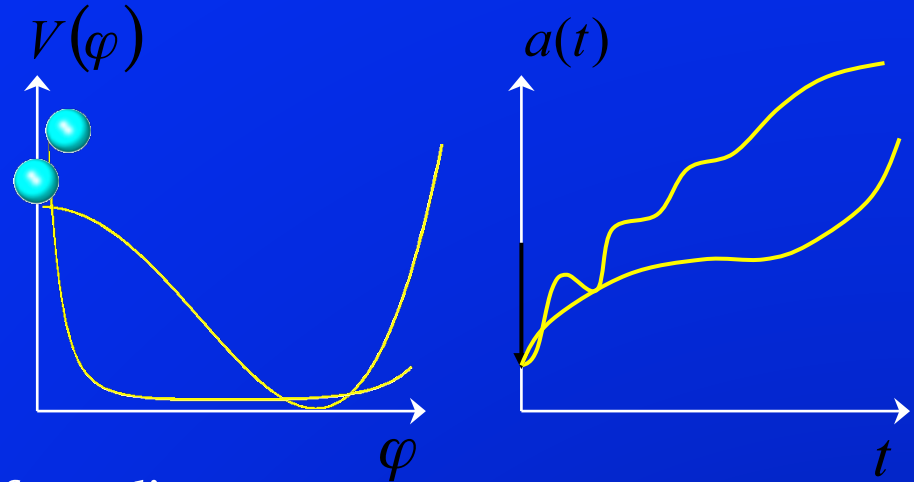
Quintessence: Wetterich 1998, Ratra & Peebles 1988, ...

- EN Dynamique, ρ_Q dépend du temps

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

$$V(\phi) = V_0 f(\phi) \quad , \quad \ddot{\phi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\phi} + \frac{dV}{d\phi} = 0$$

- EN inhomogène : $\exists \delta\phi(k,t) \neq 0$ (CMB)
- EN comme une violation de la condition forte d'énergie



$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_m + \rho_Q + 3p_Q) \quad \ddot{a} > 0 \text{ if } p_Q < -\frac{\rho_Q + \rho_m}{3} \quad (\dot{\phi}^2 \ll V(\phi))$$

- Cosmological constant **Λ CDM**:
- Ratra-Peebles (1998) potential (SUSY breaking, backreactions, ...) **RPCDM**

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

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

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

Energie Noire et Formation des Structures

Comment briser la dégénérescence des modèles d'énergie noire ?

- La formation des structures cosmiques est elle spécifique à un modèle d'énergie noire ?
- Si oui ? La dégénérescence est elle levée sur les très grandes échelles (CMB +cosmic distance test)? (Précision, reconstruction)

Grandes échelles (évolution linéaire et quasi-linéaire) :

- L'EN modifie l'évolution globale de l'Univers, $a(t)$, elle peut également “clusterer”: jusqu'à quel point alors cette dépendance spatiale et temporelle entraine-elle une modification du “clustering” de la Matière Noire. **(taux de croissance est dépendant de l'échelle et diffère de celui de Λ CDM)**

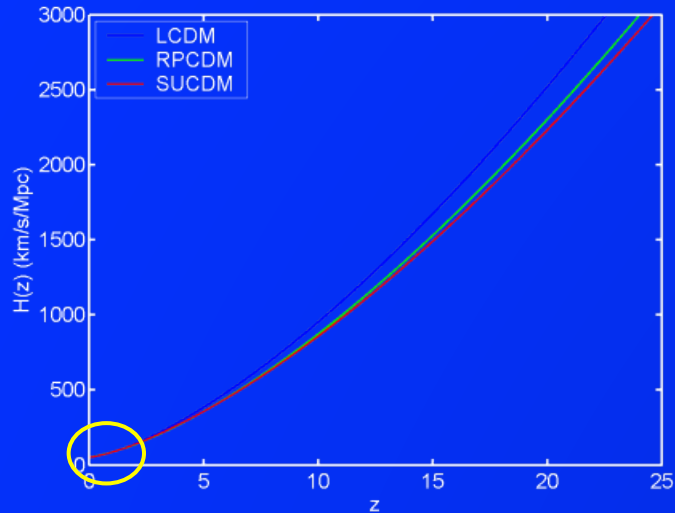
Plus petites échelles (non-linear regime):

On aurait tendance à penser

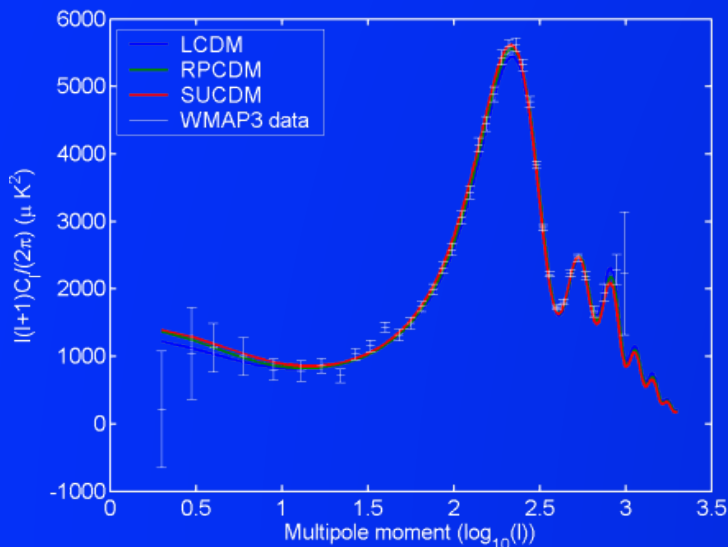
- Les effets seulement sur l'évolution globale : La fonction de masse est universelle **(Jenkins et al. '01 ...)** et les corrections non-linéaires au spectre de puissance ne diffèrent pas significativement de celle calculées sur Λ CDM **(Smith et al. '03 ...)**

Construction de modèles réalistes (Hubble diagrams of SNe Ia) and from CMB Fluctuations

Hubble Parameter



Angular Power Spectrum



- Constraints on Ω_m and $\Omega_{(\Lambda, Q)}$ from Union SNe Ia data set (Kowalski et al 2008)
- Constraints on $\Omega_b, \Omega_{CDM}, \sigma_8$ from WMAP5 (Komatsu et al 2008)

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_M + \rho_Q),$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G_*}{3} (\rho_M + \rho_Q + 3p_Q)$$

$$\ddot{\varphi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\varphi} + \frac{dV}{d\varphi} = 0$$

Modification du code CAMB en prenant en compte
Les inhomogénéités du champs scalaire.

σ_8 plus bas que pour Λ CDM

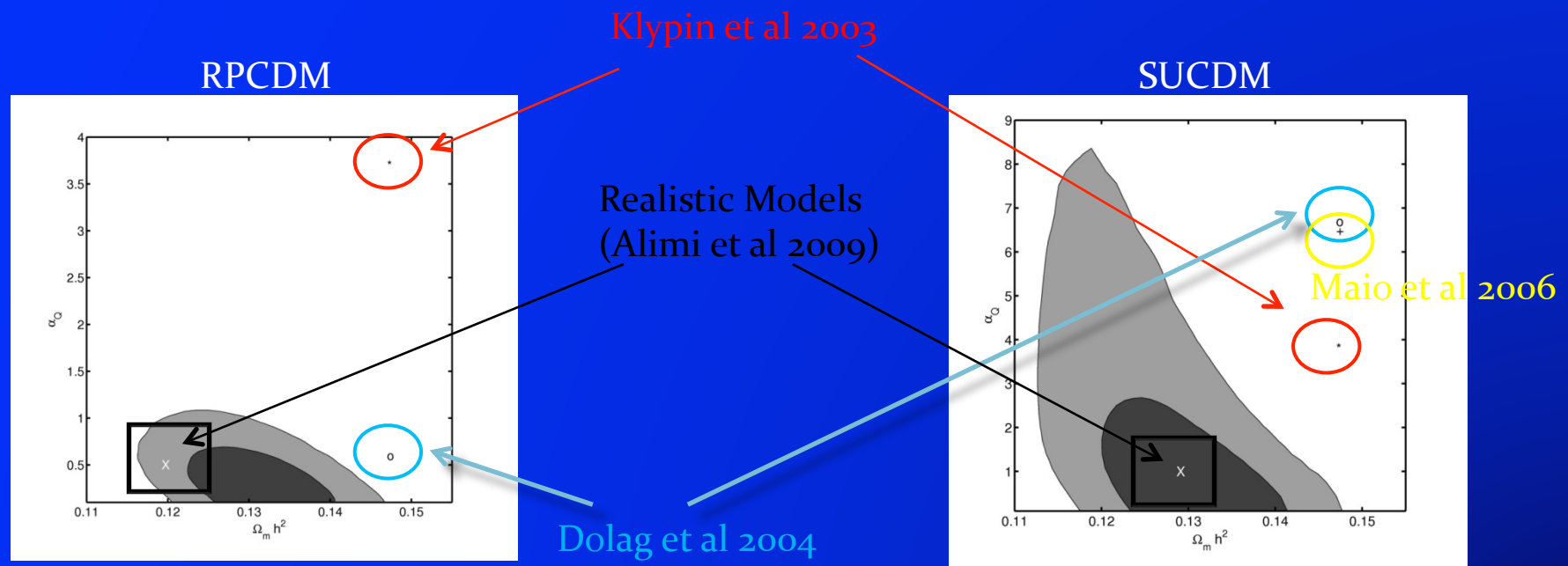
$$\delta\varphi'' + 2H\delta\varphi' + \left(k^2 + a^2 \frac{d^2V}{d\varphi^2} \right) \delta\varphi + 2\Phi a^2 \frac{d^2V}{d\varphi^2} - (3\Psi' + \Phi')\varphi' = 0,$$

$$k^2\Psi + 3H(\Psi' + h\Phi) = -4\pi a^2 \rho_a \delta_a$$

$$\Psi' + H\Phi = 4\pi a^2 \rho_a (1 + \omega_a) v_a$$

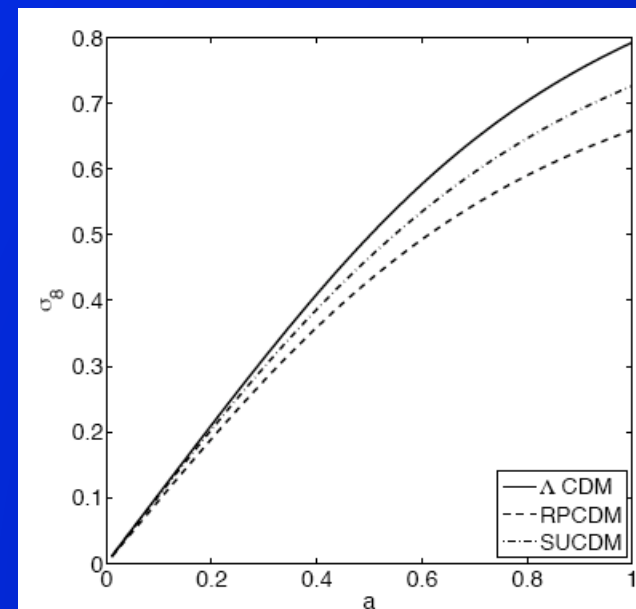
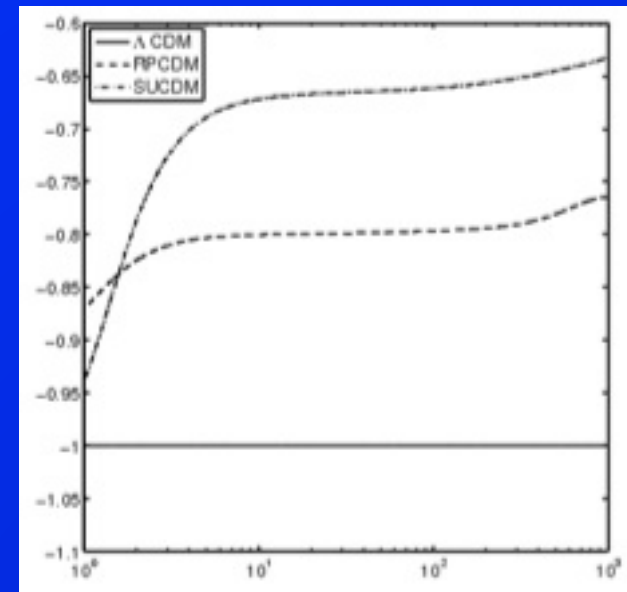
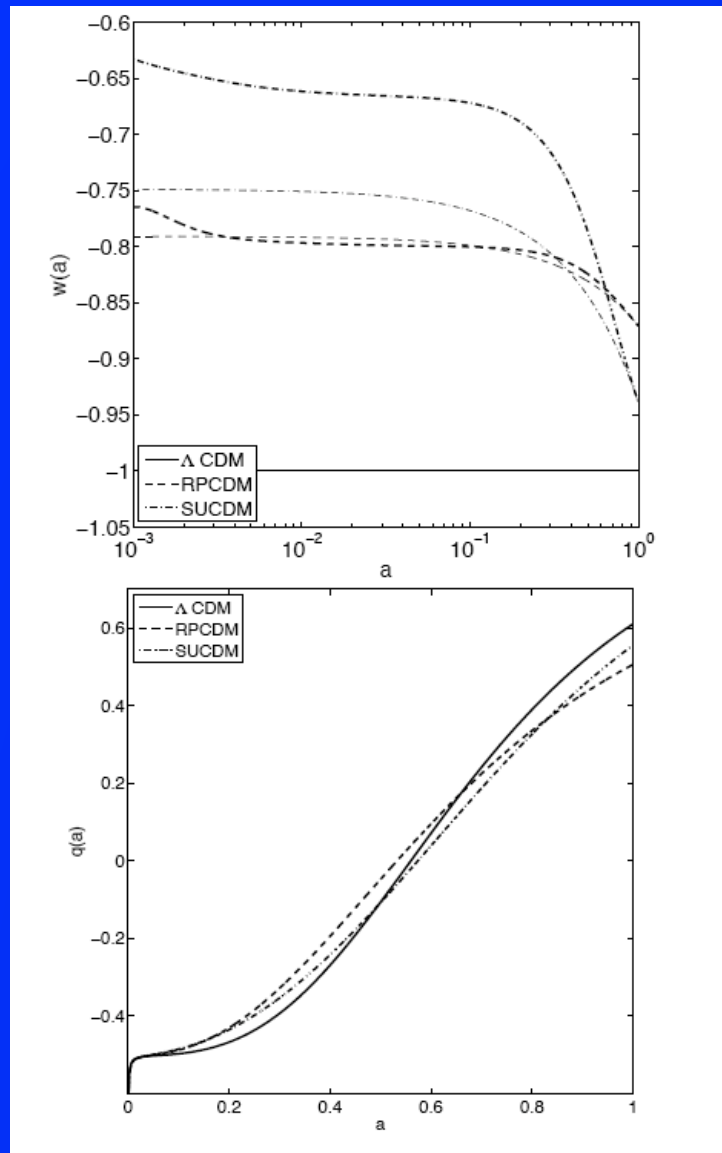
Construction de modèles réalistes (Hubble diagrams of SNe Ia) and from CMB Fluctuations

Région de confiance des modèles de quintessence RP et SUGRA dans le plan $(\Omega_M h^2, \alpha)$ obtenues de l'analyse combinée de WMAP5 (Komatsu et al 2008) et UNION SNe Ia data set (Kowalski et al 2008)



Hypothèse: Univers Plat, Conclusion: Faible Pente, $\Omega_m h^2$ légèrement plus bas que pour Λ CDM

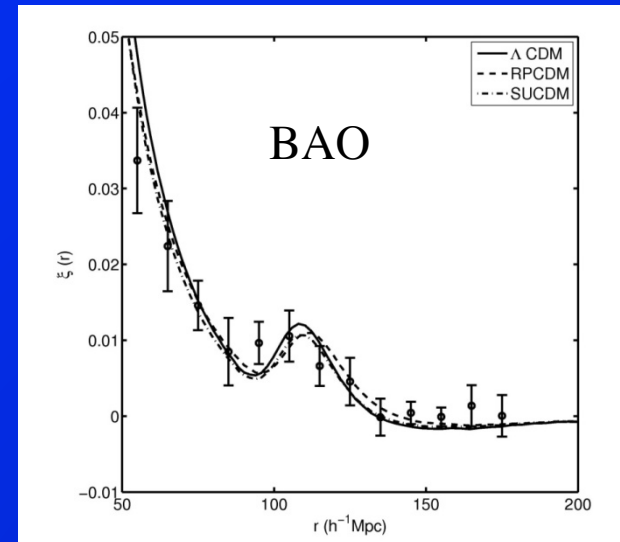
Equation d'état, accélération et taux de croissance linéaire



Construction de modèles réalistes (Hubble diagrams of SNe Ia) and from CMB Fluctuations

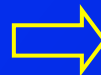
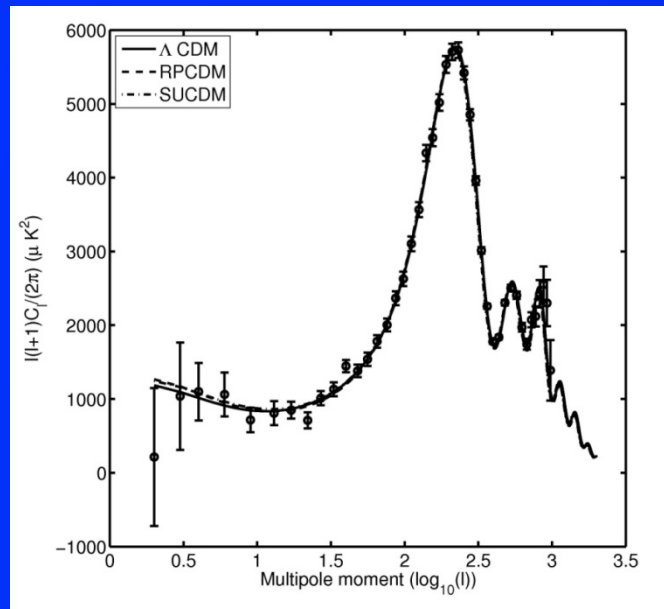
- Realistic Quintessence and cosmological constant DE models are equivalent to explain CMB and SNe Ia

Parameters	Λ CDM	RPCDM	SUCDM
Ω_m	0.26	0.23	0.25
α	0	0.5	1
A_S	2.1×10^{-9}	2.0×10^{-9}	2.1×10^{-9}
Derived parameters			
σ_8^{lin}	0.80	0.66	0.73
$\lambda(\text{eV})$	2.4×10^{-3}	4.9	2.1×10^3
w_0	-1	-0.87	-0.94
w_1	0	0.08	0.19

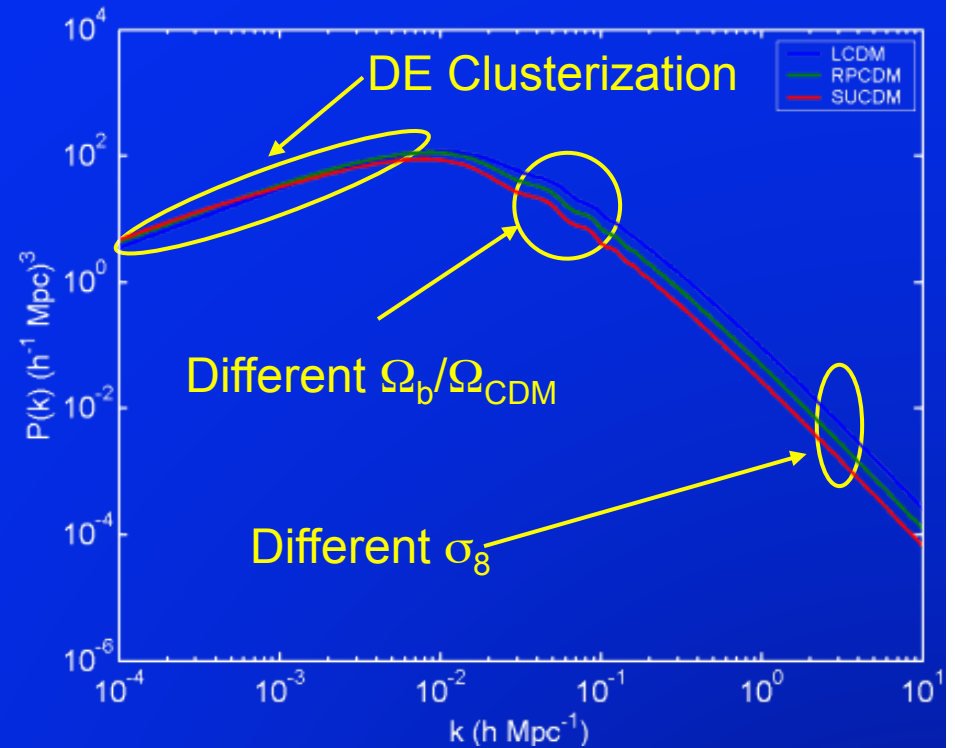


- Degeneracies of the models: Structuration as a discriminating test ?!
- Λ CDM vs QCDM's : frozen vs dynamical DE
- RPCDM vs SUCDM: varying $w(z)$ (/ w constant)

Spectre de puissance linéaire de la matière, conditions initiales z_{start}



Linear Matter Power Spectrum



Benchmark Models & Software Implementation

Cosmological Models:

Parameters	Λ CDM	RPCDM	SUCDM
Ω_m	0.26	0.23	0.25
α	0	0.5	1
A_S	2.1×10^{-9}	2.0×10^{-9}	2.1×10^{-9}
Derived parameters			
σ_8^{lin}	0.80	0.66	0.73
$\lambda(\text{eV})$	2.4×10^{-3}	4.9	2.1×10^3
w_0	-1	-0.87	-0.94
w_1	0	0.08	0.19

Parameters	162 $h^{-1}\text{Mpc}$	648 $h^{-1}\text{Mpc}$	1296 $h^{-1}\text{Mpc}$
z_{ini}	93	56	41
$m_p(h^{-1} M_\odot)$	2.28×10^9	1.46×10^{11}	1.17×10^{12}
$\Delta_x(h^{-1}\text{kpc})$	2.47	19.78	39.55
l_{max}	7	6	6
z_{ini}	81	50	37
$m_p(h^{-1} M_\odot)$	2.02×10^9	1.30×10^{11}	1.04×10^{12}
$\Delta_x(h^{-1}\text{kpc})$	2.47	19.78	39.55
l_{max}	7	6	6
z_{ini}	92	55	40
$m_p(h^{-1} M_\odot)$	2.20×10^9	1.41×10^{11}	1.13×10^{12}
$\Delta_x(h^{-1}\text{kpc})$	2.47	19.78	39.55
l_{max}	7	6	6

N-Body Initial conditions:

- $P_{\text{lin}}(k)$ including effect δQ , evolved backward up to z_{ini} with $D_+(z)$
- z_{ini} determined solving

$$\frac{\sigma(L/n, z_i)}{\sigma(L/n, z=0)} = D_+(z_i)$$

- All implemented in MPGRAFIC

N-Body Solver:

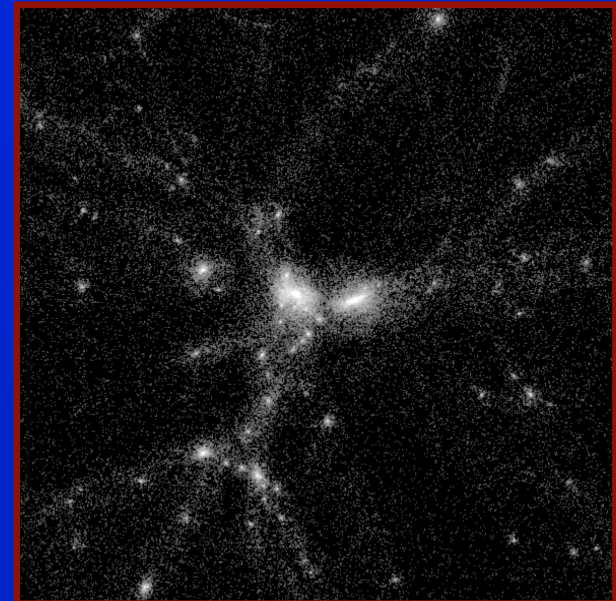
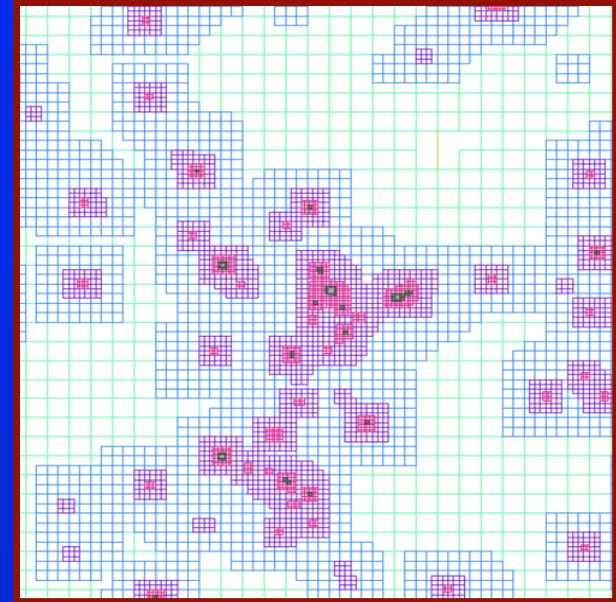
- RAMSES

First Simulations

- 512³ particles

High resolution N-Body simulations

- Initial conditions generator: MPGRAFIC
 - Parallel version of GRAFIC (Prunet et al, 2008)
 - Gaussian random field and Zel'dovich approximation
 - Cosmological routines modified for quintessence
- N-Body solver: RAMSES
 - AMR code with PM solver (Teyssier, 2002)
 - Multigrid method for Poisson equation
 - MPI parallelization: domain decomposition based on Peano-Hilbert curve
 - Cosmological routines modified for quintessence



High resolution N-Body simulations

- Simulation set:
 - 9 simulations : 3 boxlengths and 3 cosmologies
 - 512^3 particles and 512^3 coarse-grid cells
 - More than 6 refinement levels
 - Initial redshift deep in the linear regime

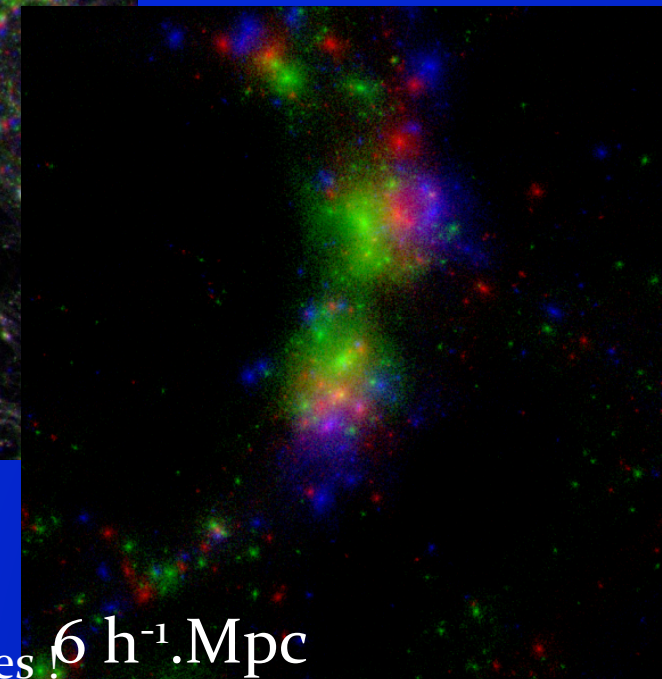
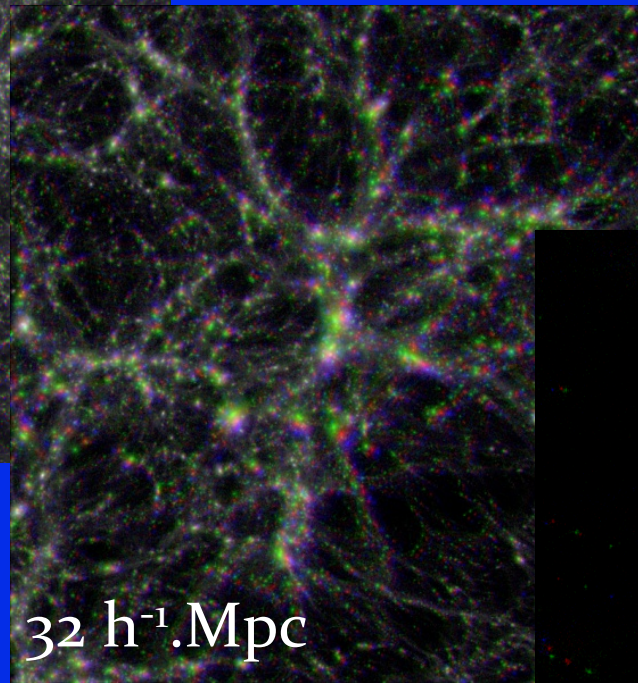
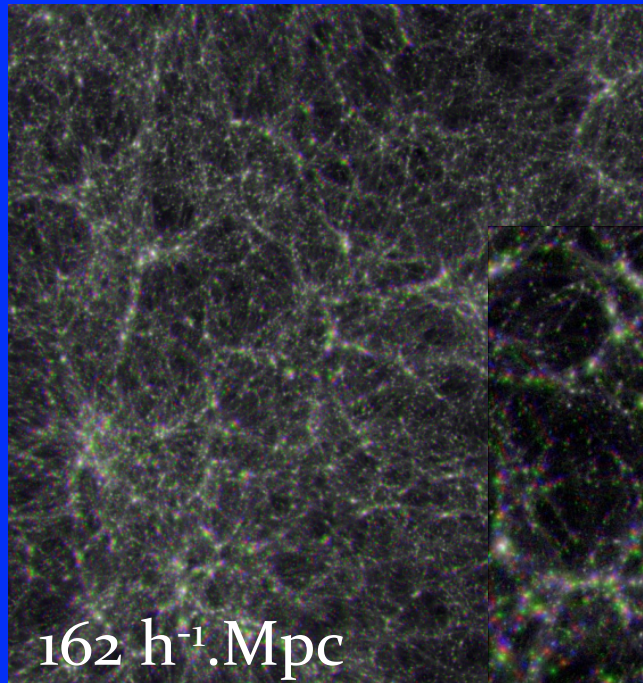
ΛCDM

**Ratra-Peebles
(RPCDM)**

**Sugra
(SUCDM)**

Parameters	162 h ⁻¹ Mpc	648 h ⁻¹ Mpc	1296 h ⁻¹ Mpc
z_{in}	93	56	41
$m_p(\text{h}^{-1} \text{M}_\odot)$	2.28×10^9	1.46×10^{11}	1.17×10^{12}
$\Delta_x(\text{h}^{-1} \text{kpc})$	2.47	19.78	39.55
l_{max}	7	6	6
z_{in}	81	50	37
$m_p(\text{h}^{-1} \text{M}_\odot)$	2.02×10^9	1.30×10^{11}	1.04×10^{12}
$\Delta_x(\text{h}^{-1} \text{kpc})$	2.47	19.78	39.55
l_{max}	7	6	6
z_{in}	92	55	40
$m_p(\text{h}^{-1} \text{M}_\odot)$	2.20×10^9	1.41×10^{11}	1.13×10^{12}
$\Delta_x(\text{h}^{-1} \text{kpc})$	2.47	19.78	39.55
l_{max}	7	6	6

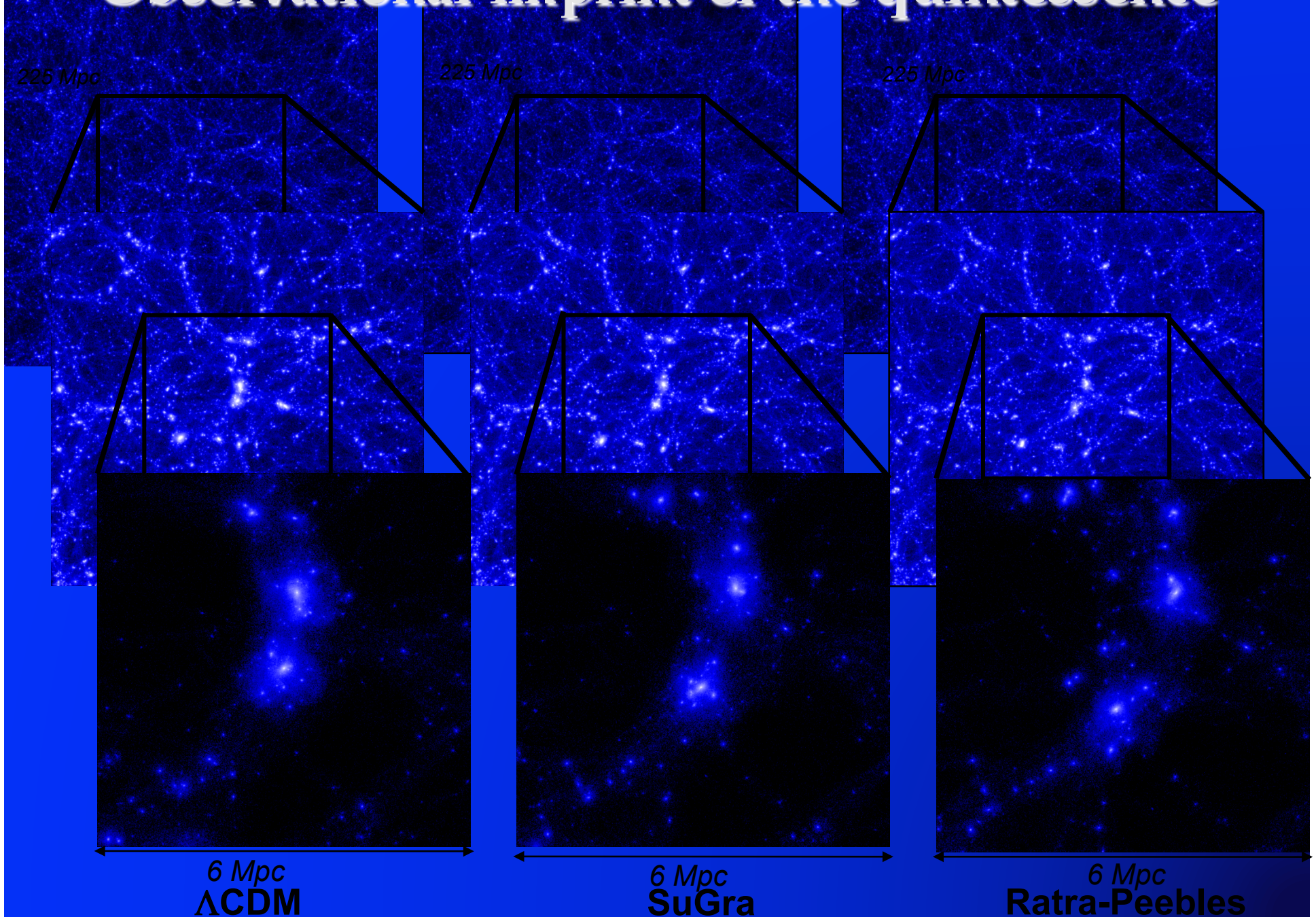
Observational imprint of the quintessence



- * Λ CDM
- * SUCDM
- * RPCDM

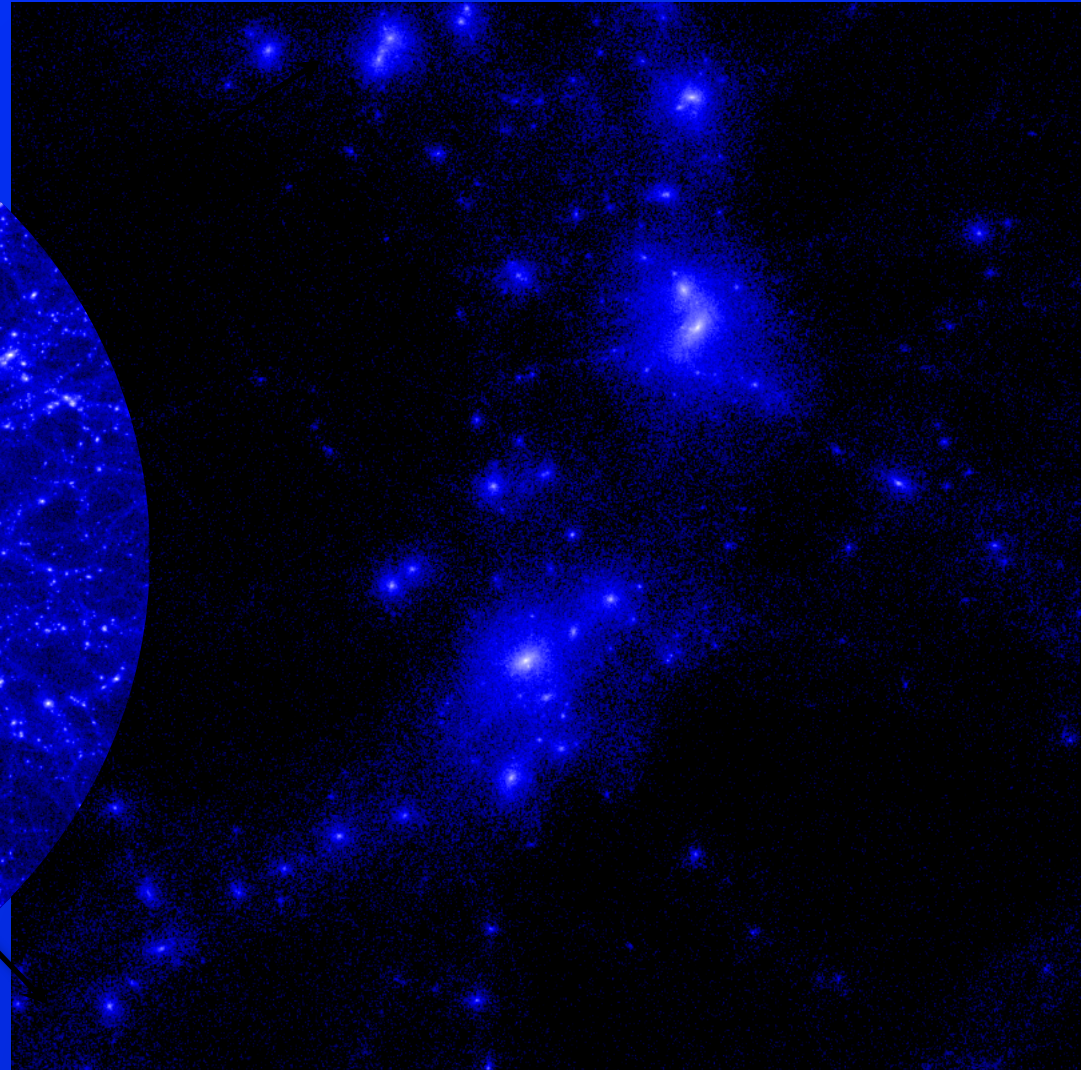
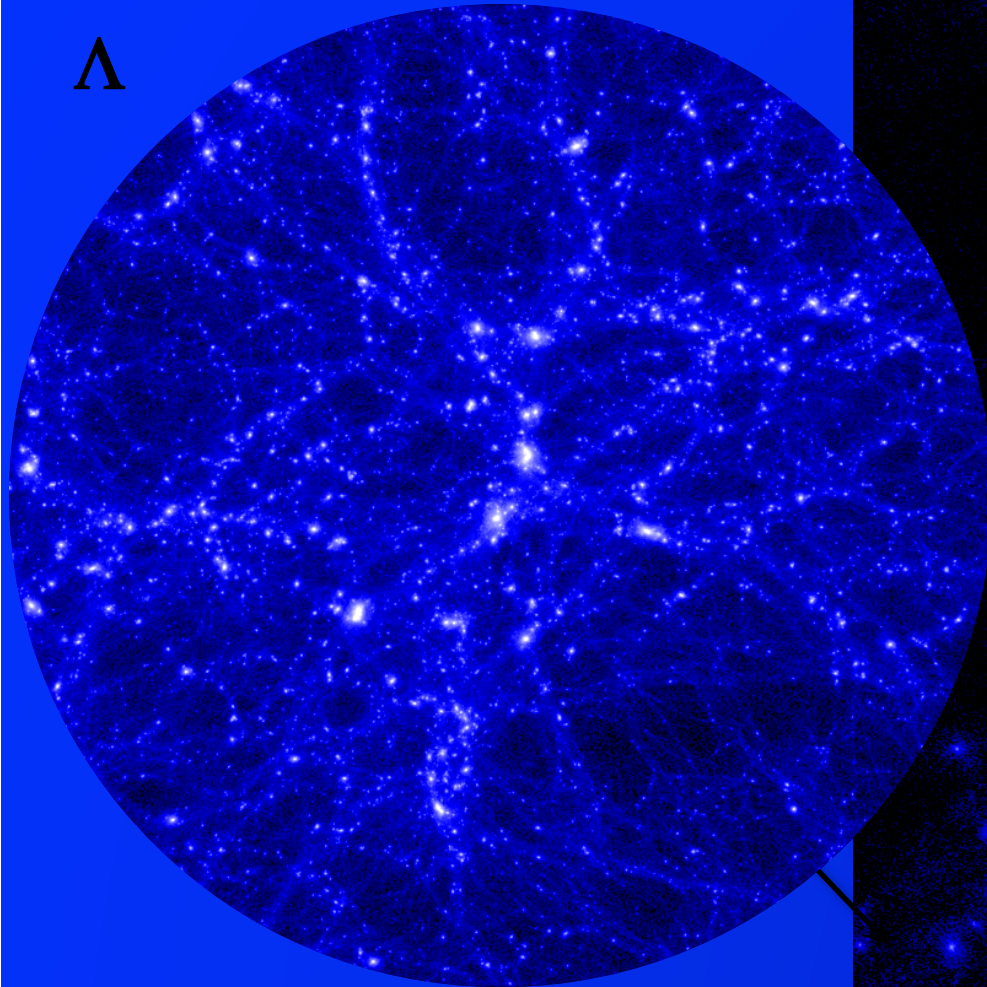
Very high density structures are localized at different places !
Concentrations are different !

Observational imprint of the quintessence



Observational imprint of the quintessence

Λ

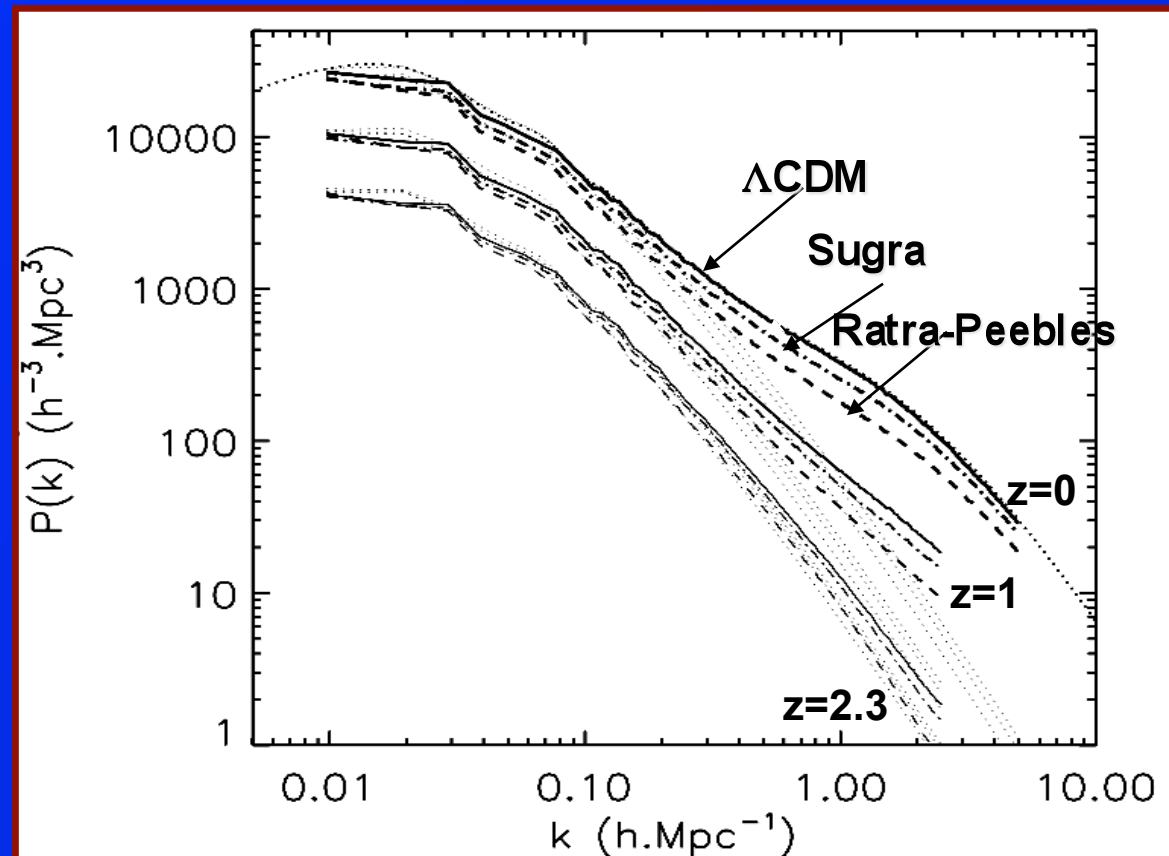
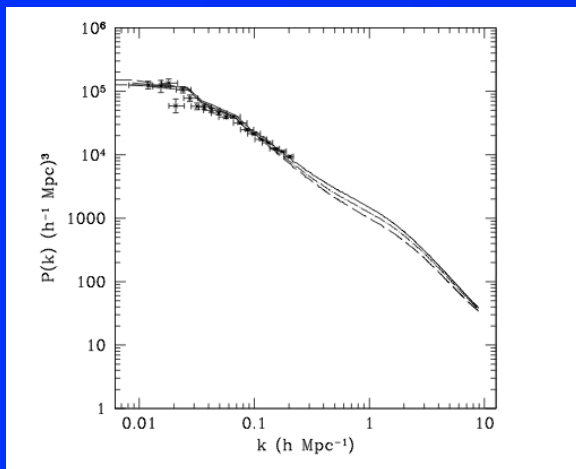


RPCDM

Imprints of dark energy on structure formation

Power spectrum
estimator:
POWMES (Colombi
et al, 2009)

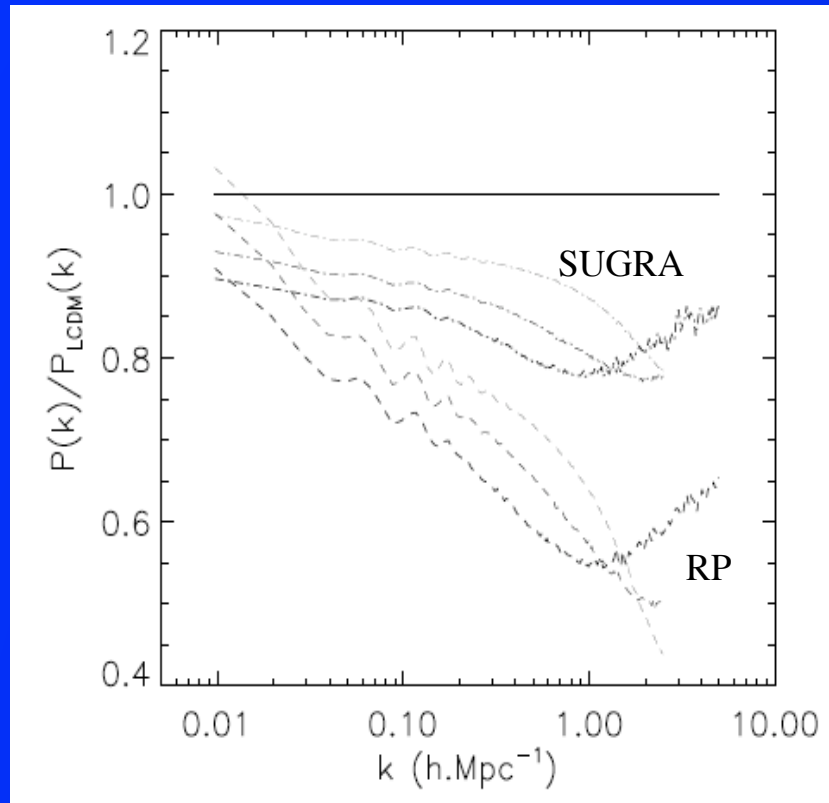
3 cosmologies are in
good agreement with
SDSS



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

Empreinte de la quintessence sur la formation des structures

Le spectre de puissance Non-linéaire



A smaller amount of clustering
with respect to Λ CDM

It exists a characteristic non-linear scale
(corresponding to the minimum of the ratio)
below which the DM clustering increases
as function of k .

Such a scale shifts from the right to the left
(from about 1 h Mpc^{-1} to 3 h Mpc^{-1}) for
increasing redshift

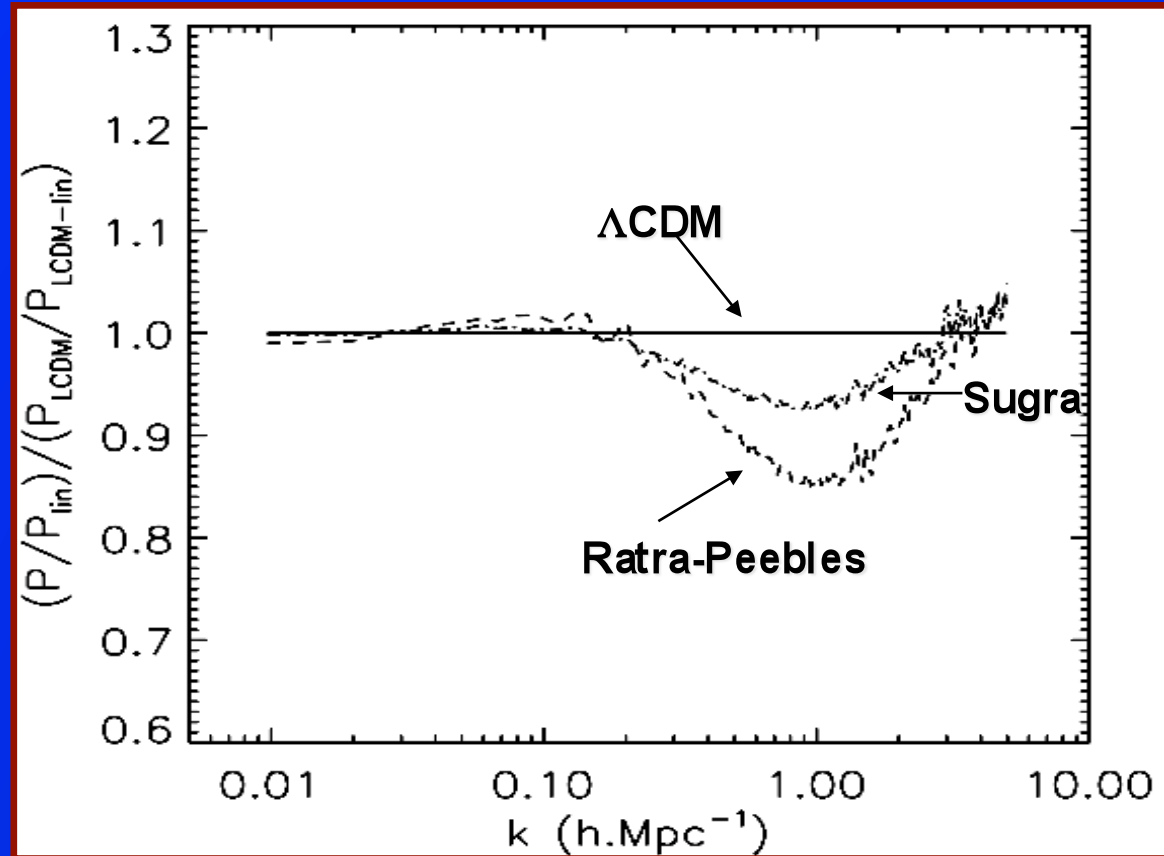
- **GOAL:** isolate contributions to the non-linear matter power spectrum
- **First (linear regime):** linear power spectrum normalization and shape

Imprints of dark energy on structure formation

Let's remove the linear contribution and take Λ CDM as a reference

On the scales below the location of the minimum of the ratio (about 1 h Mpc^{-1}) the non linear clustering of DM in Quintessence models increases very rapidly, exceeding that of Λ CDM.

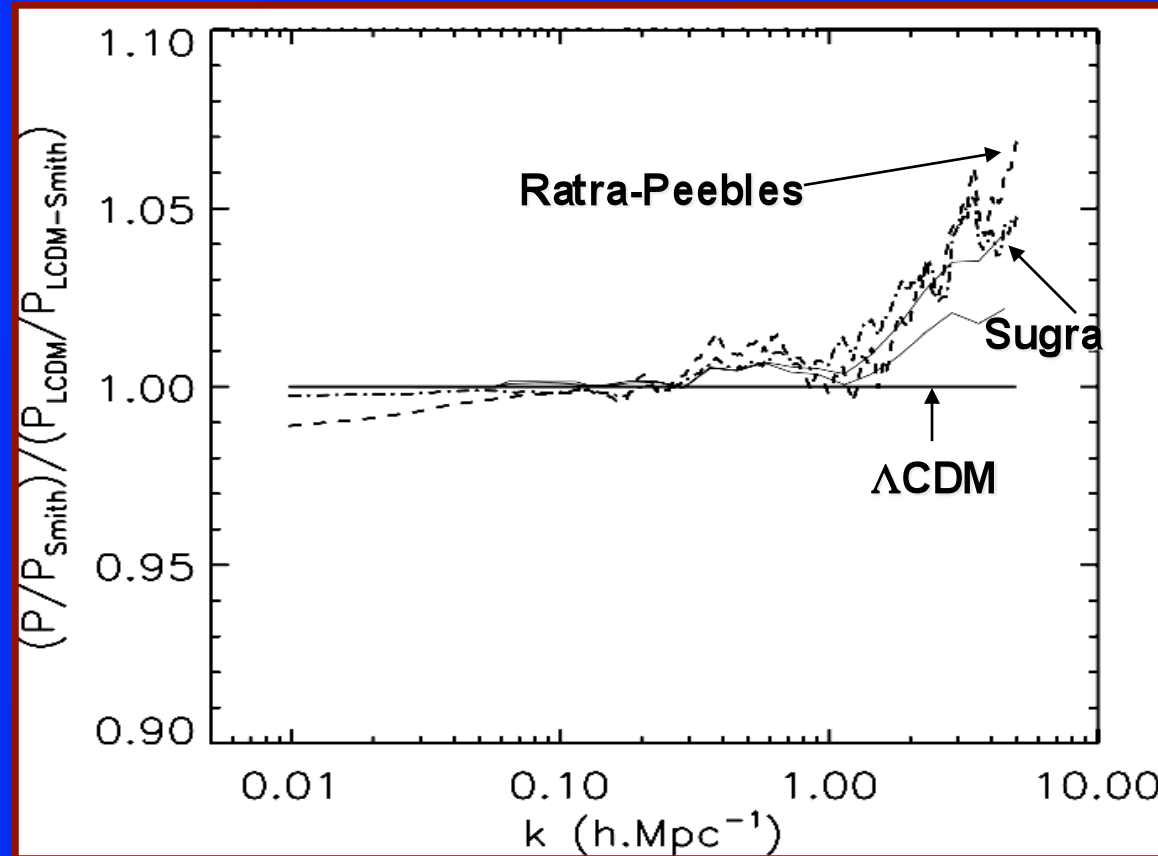
As time elapses the non linear growth of structure becomes more and more efficient in QCDM models than in Λ CDM, with the RPCDM having larger growth than the SUCDM.



- **Second contribution (quasi-linear regime):** non-linear amplification of linear growth rate
- **Third contribution (sable-clustering regime):** saturation-virialization

Imprints of dark energy on structure formation

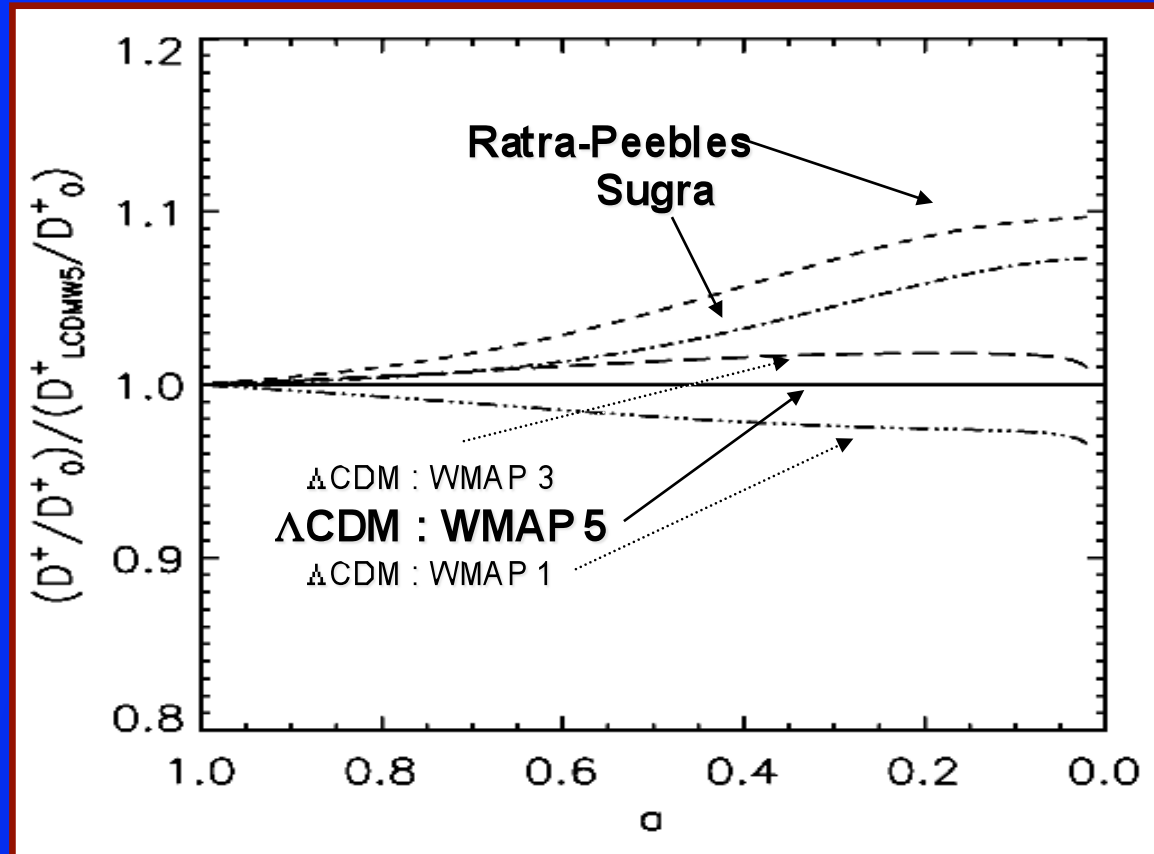
Let's remove
previous
contributions:
normalization by
Smith et al, 2003



- Flaw: Most of the current predictions are instantaneous
- **Fourth contribution (stable-clustering regime):** history of structure formation

3. Imprints of dark energy on structure formation

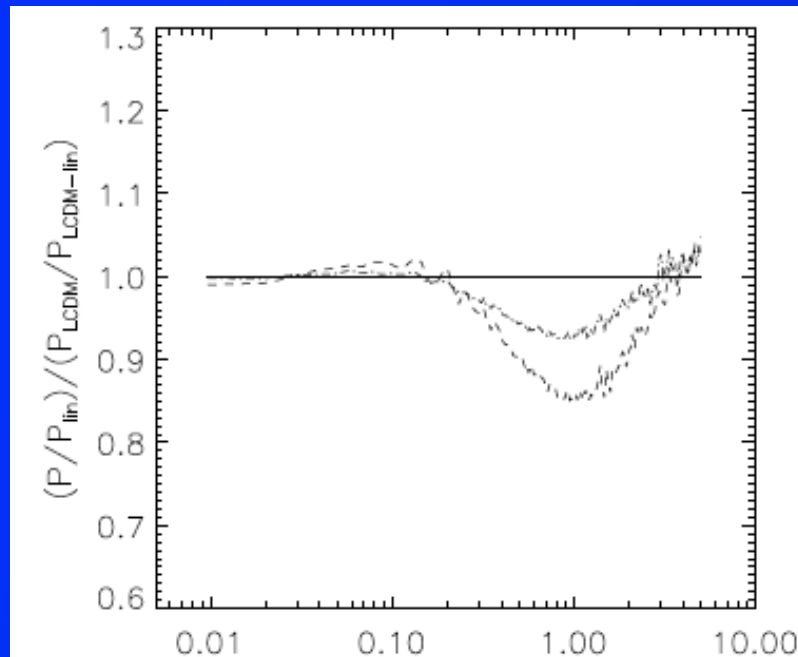
Ma 2007:
correlation of
deviations with
linear growth
history



- Confirm the correlation for **realistic** quintessence models
- Next step: include history in power spectrum prediction using halo model
 - need to study mass function and halo profile in DE models
 - need very high resolution simulations!

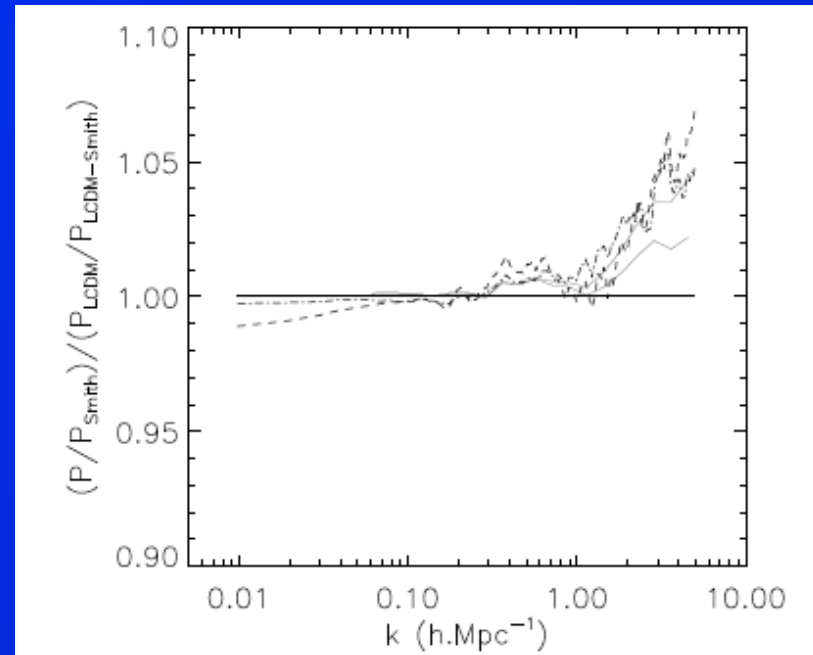
Signature de l'énergie noire sur les échelles non-linéaires

On « soustrait » les différences initiales et linéaires



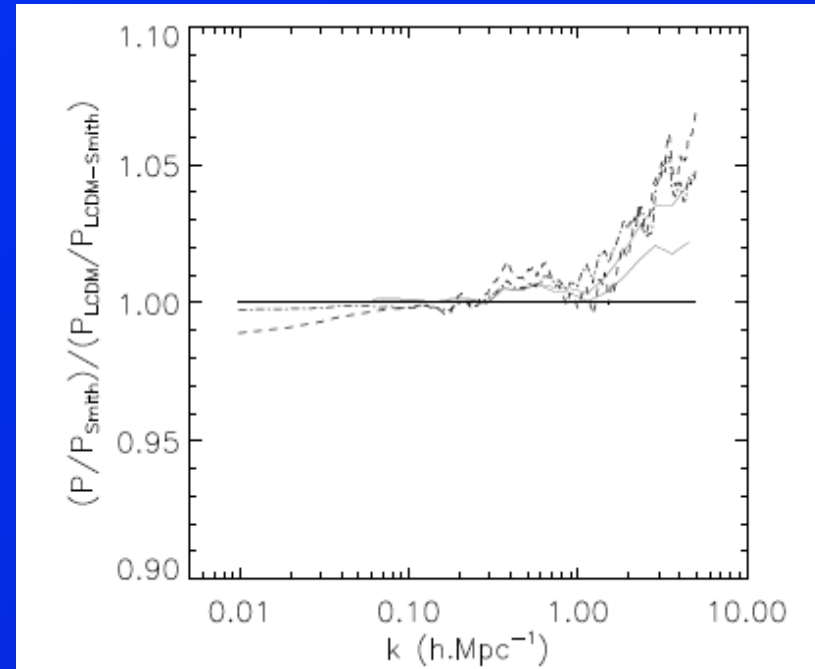
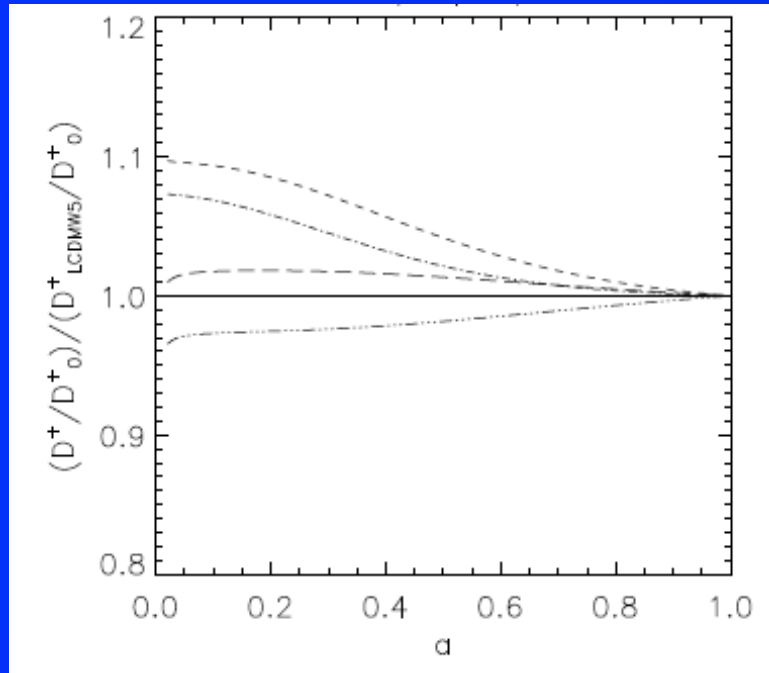
Les différences subsistent

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.

(Alimi et al MNRAS 2009, arxiv 0903.5490)

Empreinte de l'énergie noire sur la formation des structures.

- Les dynamiques linéaire et non-linéaire conservent une trace spécifique de l'énergie noire.
- Les propriétés des structures cosmiques sont les signatures de l'énergie noire.

DEUS
(Dark Energy Universe Simulation)
Consortium
(www.deus-consortium.org)

Motivations

- Mise à disposition d'un ensemble de données issues d'un ensemble de simulations numériques et spécialement de simulations Grand Challenge.
 - serveur ftp (~40 Toctets Grand Challenge + ...),
 - base de données DEUV O,
 - service WEB, convivialité.
- Valorisation des méthodes d'analyses
- Partage de Moyens (logiciel, matériel, humain)
- Synergie des expertises
 - Simulation Numériques / Grands Projets Observationnels (Sondes primaires (SN, WL, BAO) Sondes secondaires (cluster, Effet SW, Distortion en z...)
(LSST (SN), EUCLID (BAO, WL), BigBOSS (BAO), SKA (WL, BAO), ...)
 - SN/ Théorie - Théorie / Théorie - Grands Projets observationnels / Théorie

DEUSS - Babel Runs



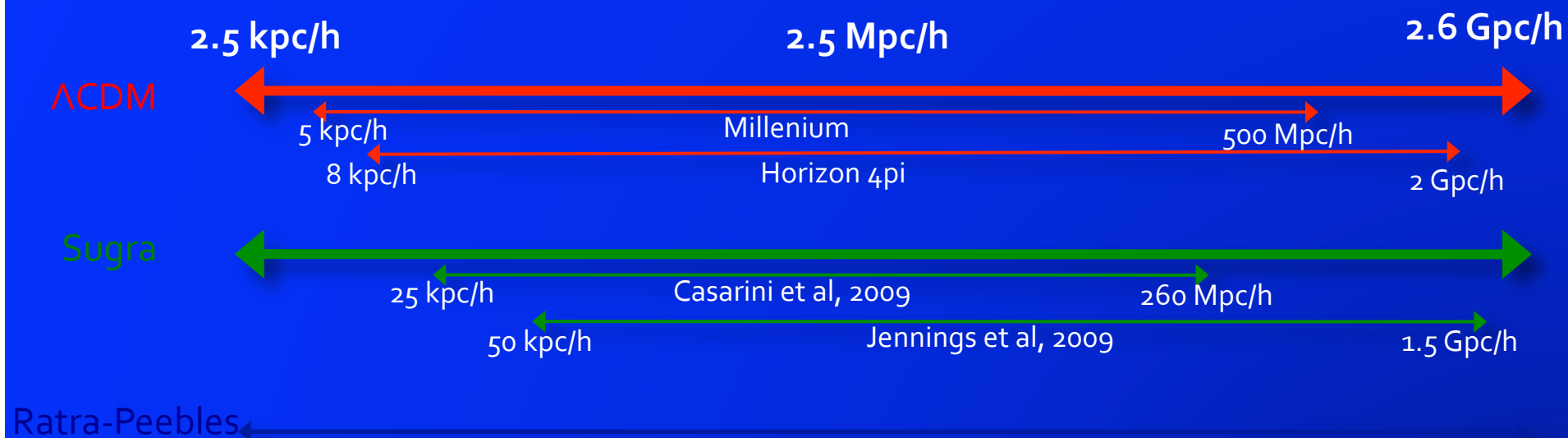
Simulation Series Characteristics:

- 1024^3 particles
- 3 box length: 2592, 648, 162 h^{-1} Mpc
- mass resolution: $2 \times 10^{10} - 6 \times 10^{16} h^{-1} M_{\oplus}$
- spatial resolution: up to 3 h^{-1} kpc, with up to 7 billion cells per simulation

High-performance parallel computing: IBM Bluegene/P at IDRIS

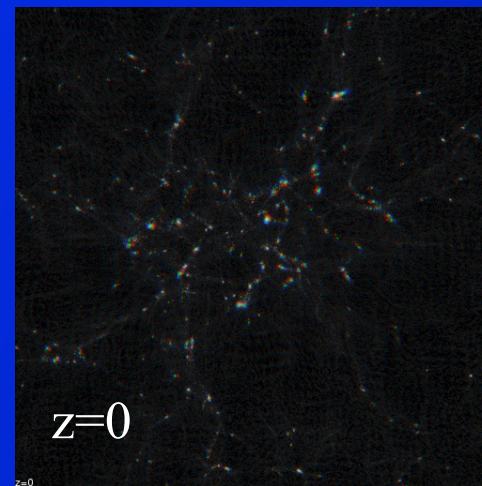
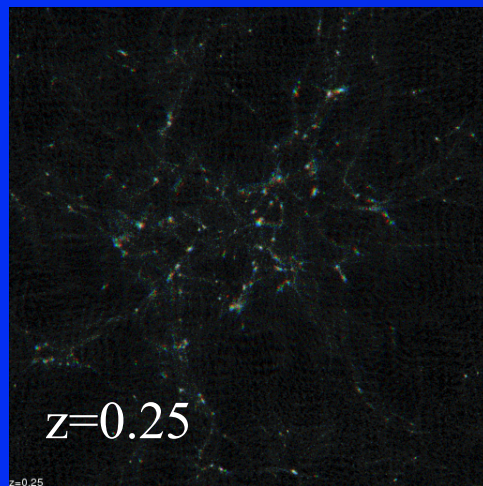
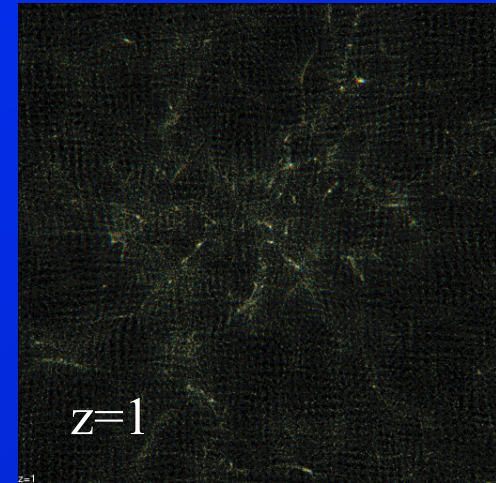
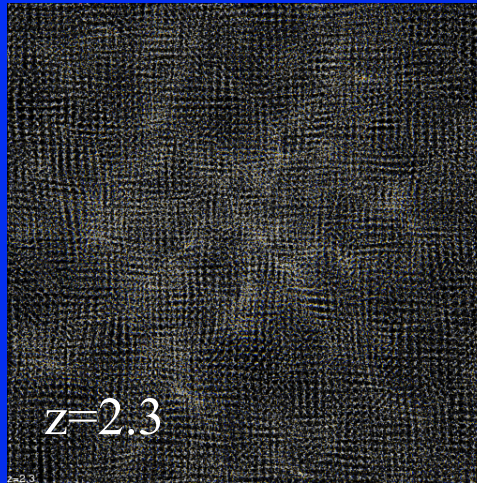
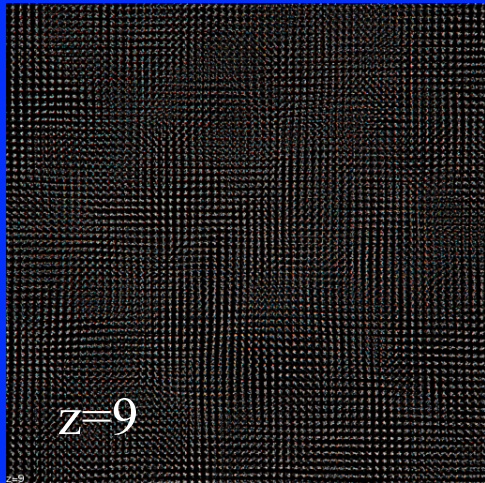
- 5 000 000 mono-cpu hours (600 yrs) of elapsed time
- 40 TB of data in 216 snapshots, 6 lightcones, 3 smaller volumes followed at each integration time
- FOF detection: up to 500 000 halos for simulations containing from 100 to 3 000 000 particles

SIMULATIONS WITH REALISTIC DARK ENERGY COSMOLOGIES

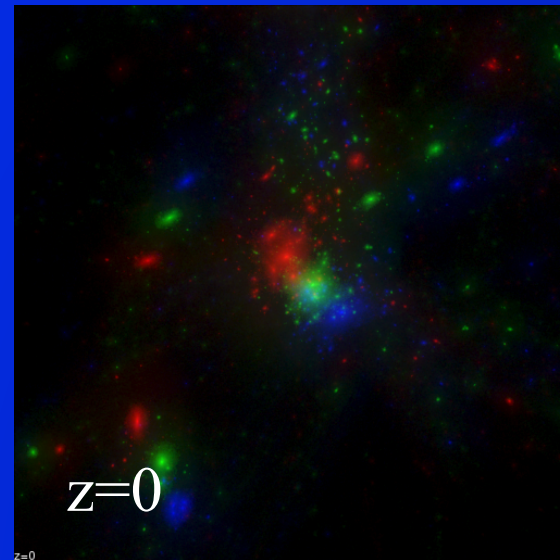
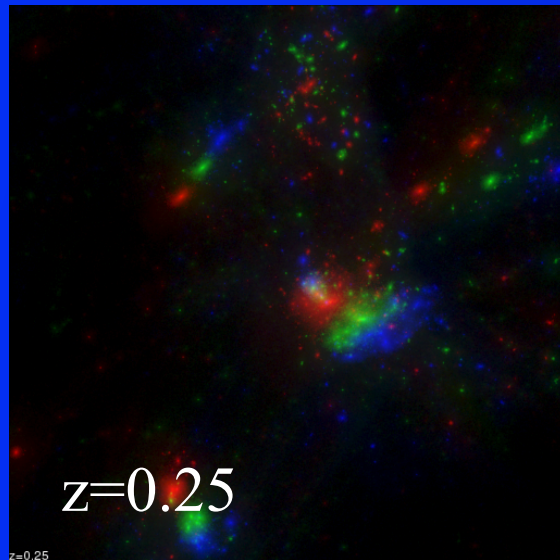
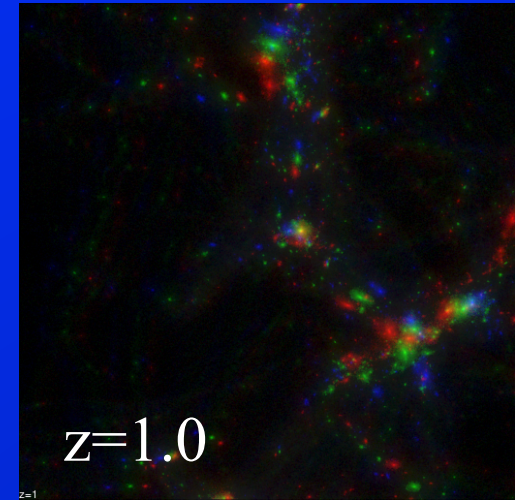
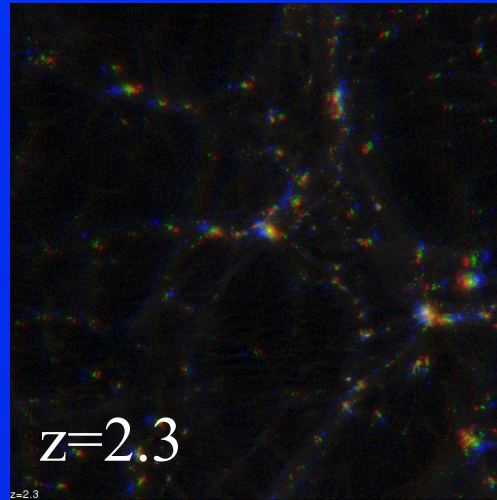
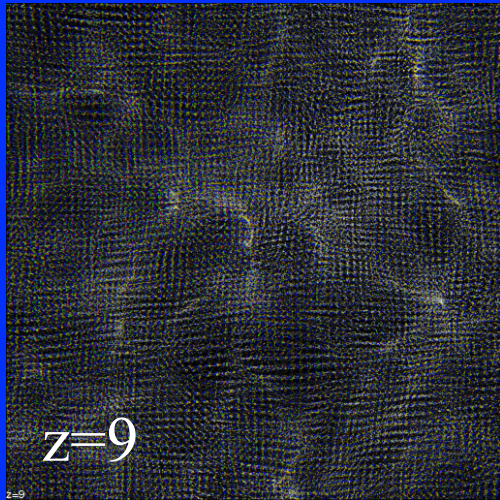


- Unprecedented spatial dynamics for dynamical dark energy simulations
- WMAP five-years + UNION data set realistic cosmologies

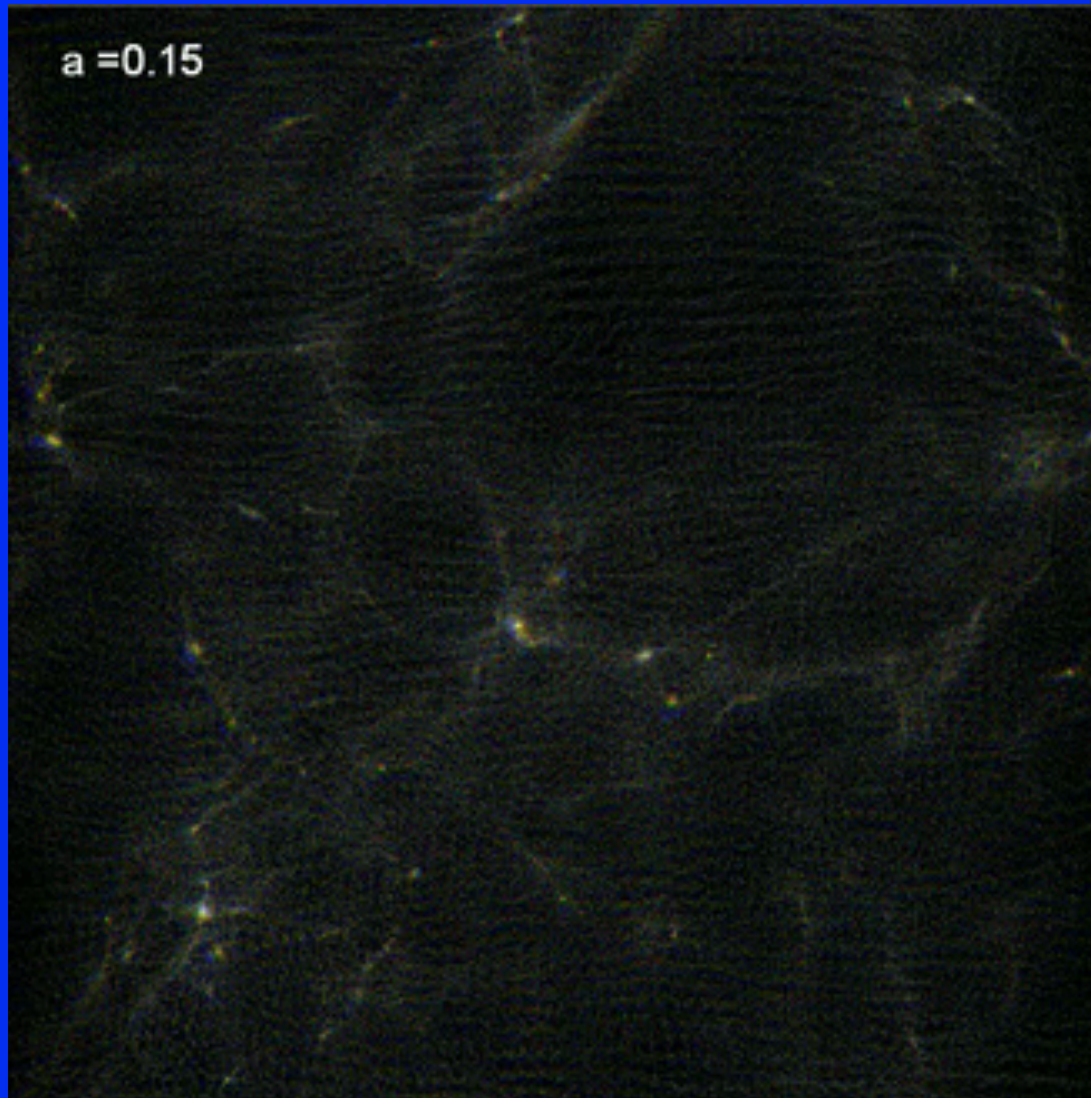
Subvolume of 162 h^{-1} Mpc from 2592 h^{-1} Mpc

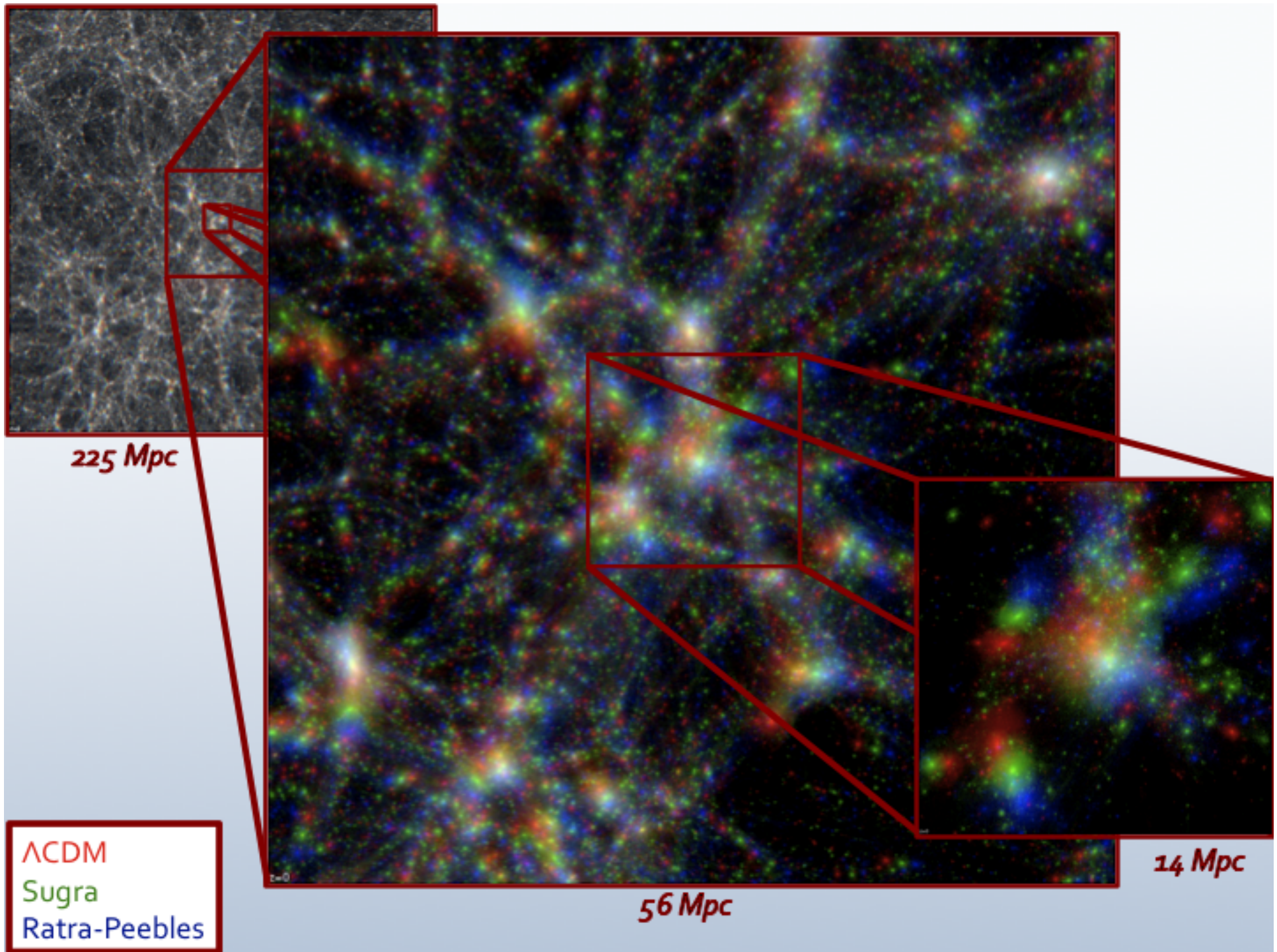


Subvolume of $10\ h^{-1}\text{Mpc}$ from $162\ h^{-1}\text{Mpc}$

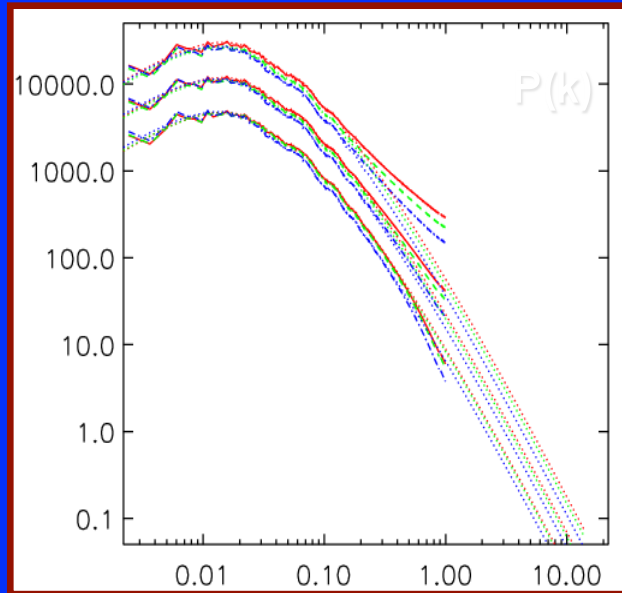


Simulation Movie Subsample

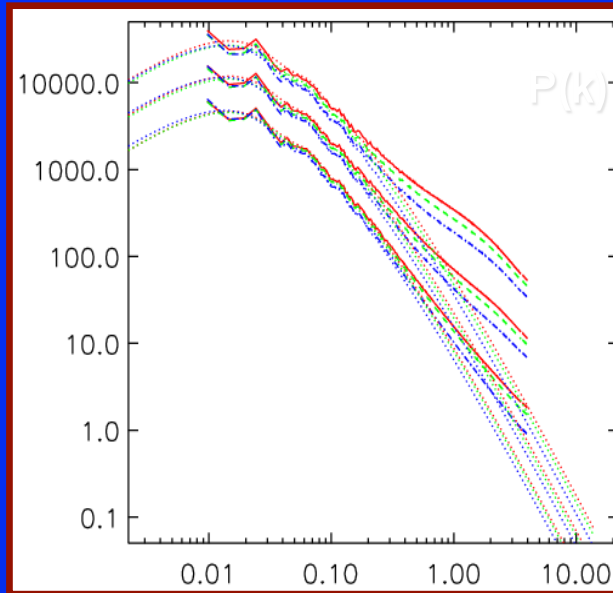




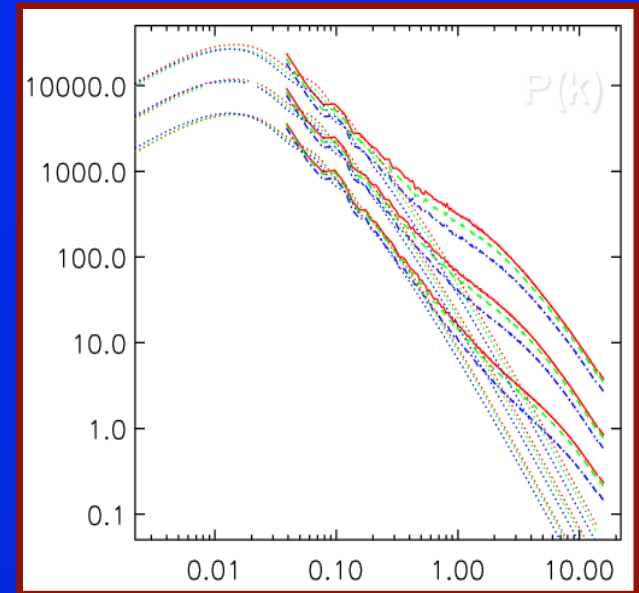
Grand Challenge en Cosmologie:



L=2592 h⁻¹Mpc

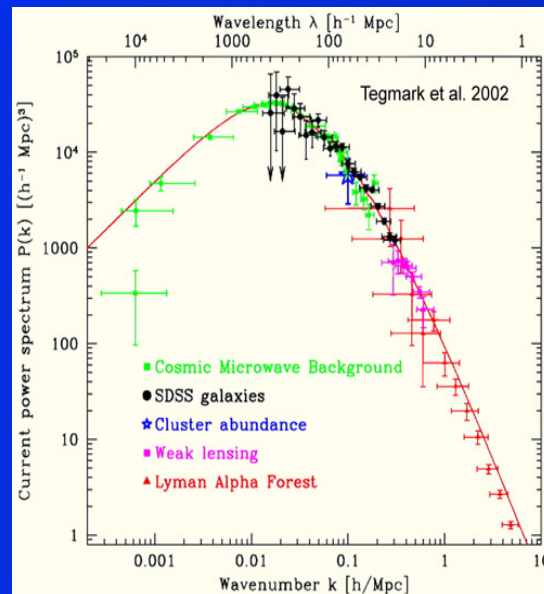


L=648 h⁻¹Mpc

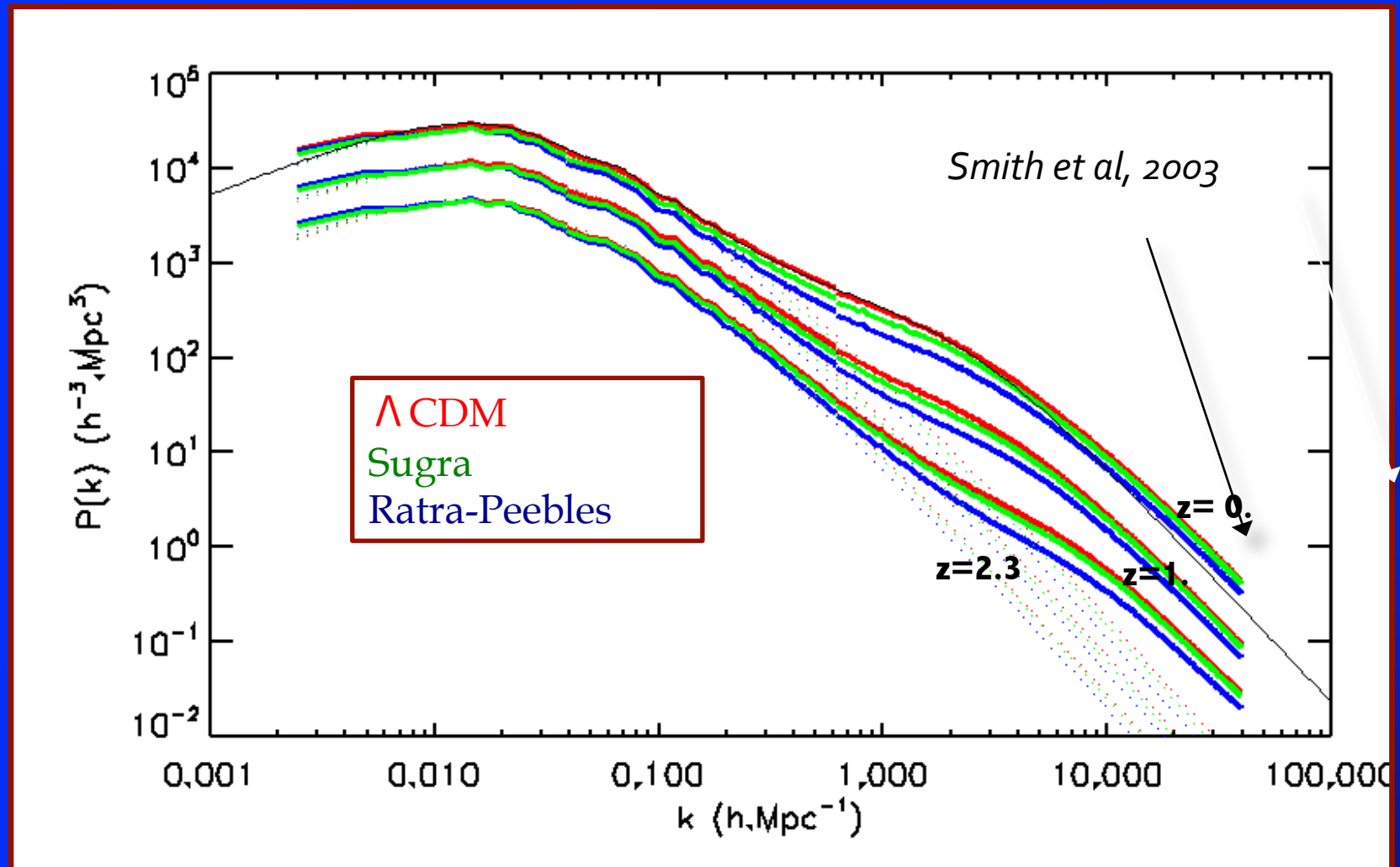


L=162 h⁻¹Mpc

**Power Spectrum /
Deep redshift Survey**



Power Spectrum



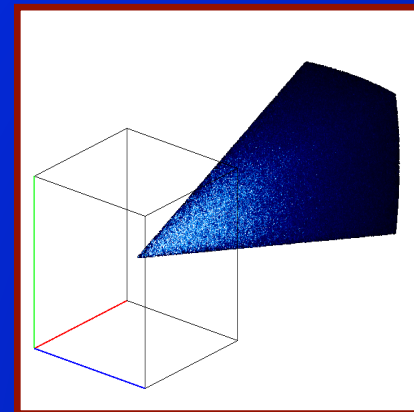
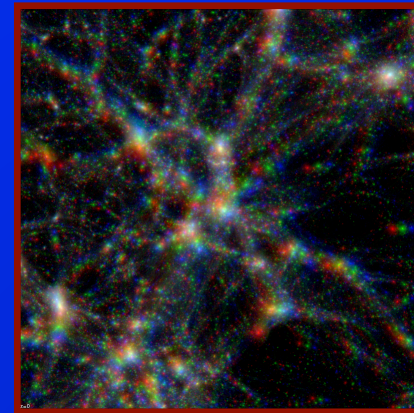
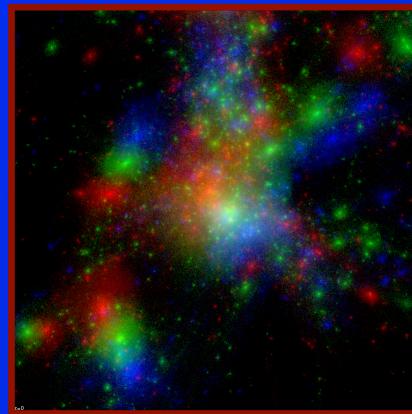
DEUS DATA

I. DEUSS (Grand Challenge)

II. Fields

III. Halos

IV. Lightcones



DEUSS RAW SIMULATION DATA

28 TB



216 Snapshots

26 TB



9 Lightcones

1.8 TB

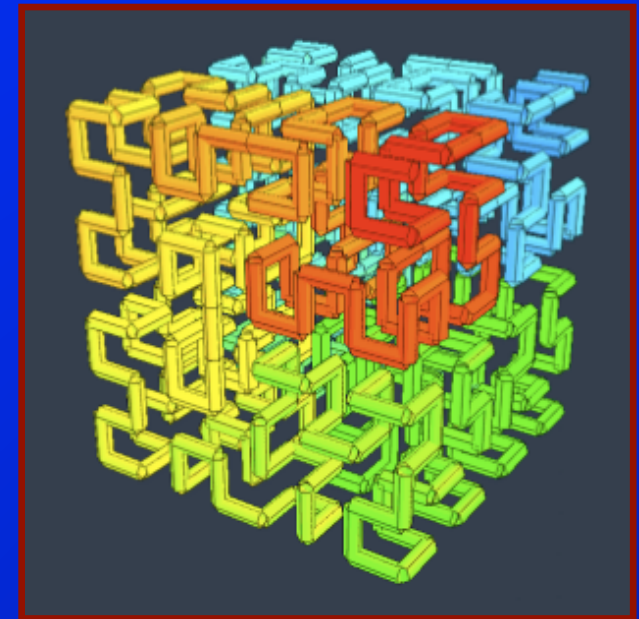
- **DON'T PANICK!**

- We have already done the dirty job (cleaning, data conversion, sorting, detection...) -> see next slides

RAW DATA: SNAPSHOTS

- **RAMSES AND THE PEANO-HILBERT WONDERS**

- RAMSES (Teyssier, 2002)
- Parallelization: MPI with Peano-Hilbert domain decomposition
- Optimal for load balancing during the run

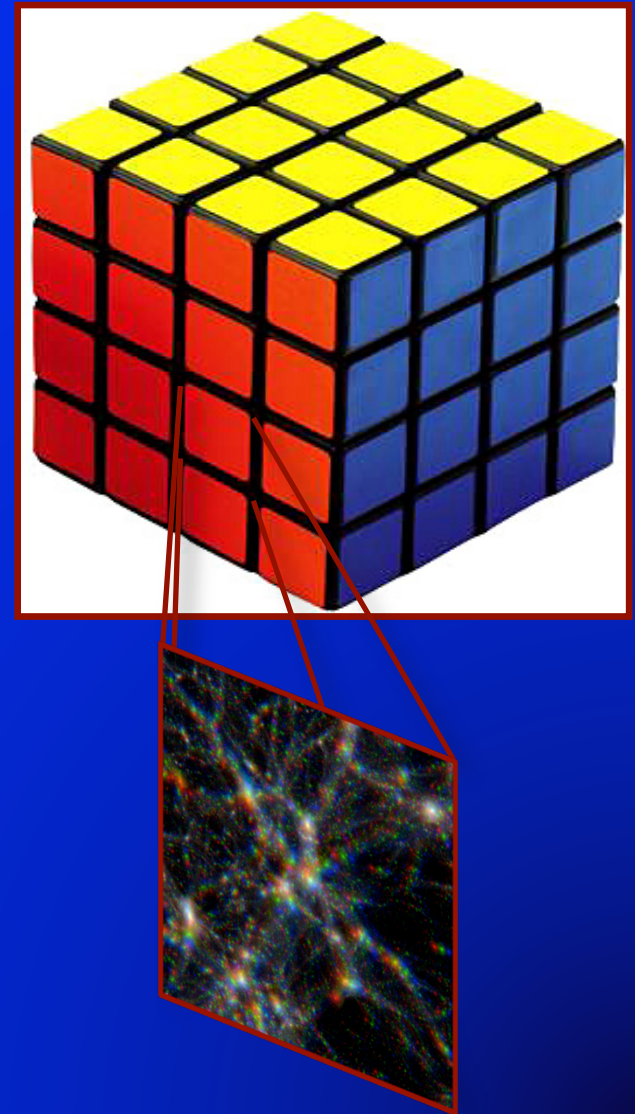


- **POSTPROCESSING AND THE PEANO-HILBERT NIGHTMARE**

- Data files organized along the Peano-Hilbert curve
- One file per cpu: too many files
- Not user friendly at all !!!

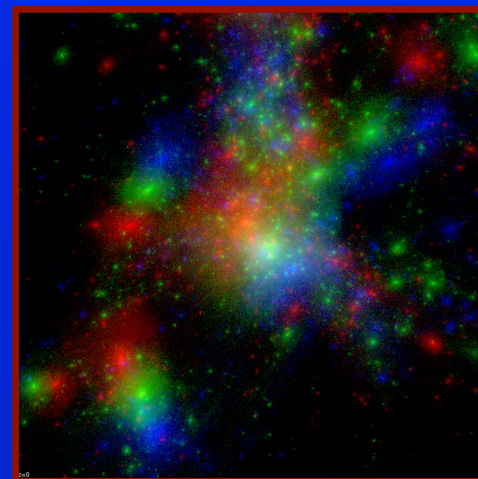
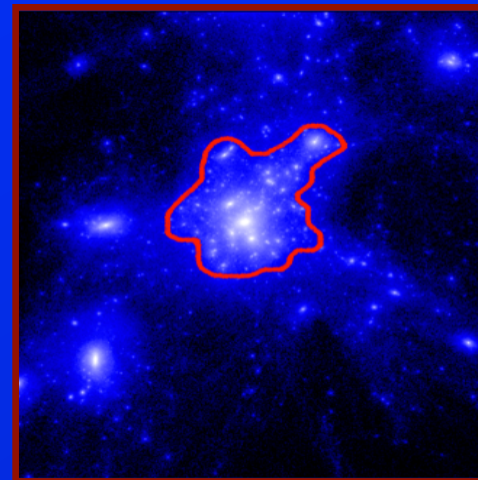
USER FRIENDLY DATA: « FIELDS » OR « CUBES »

- **PARALLEL SLICER (F. Roy)**
 - Particles redistributed in cubic subvolumes
 - one cube=one file
 - user-friendly data: load only region of interest (save time and memory)!
- **WHAT ARE THE PARTICLE PROPERTIES?**
 - position (distribution)
 - velocity (kinematics)
 - identity (evolution: follow particles from one snapshot to another)
- **WHAT ARE THE AVAILABLE REDSHIFTS?**
 - 24 snapshots per simulations
 - typically from $z=100$ to $z=0$
 - $a=a_{ini}, 0.025, 0.05, 0.1, 0.15, \dots, 0.95, 1$
- **WHAT COULD I DO WITH THIS ?**
 - Any “field” oriented analysis: correlation, distribution, filaments, WL, BAO,...



HALOS

- **PARALLEL HALO FINDER (F. Roy)**
 - Purpose: Detect halos (group of dark matter particles)
 - Strategy: Friends-of-Friends $b=0.2$
 - Output: **Particles sorted halo per halo**
- **What are the redshifts? What are the particles properties?**
 - Same as before
 - Currently half of the snapshots have been analyzed
- **What could I do with it?**
 - Any halo oriented analysis: cluster counts, SL, statistics on macroscopic properties, internal profiles...



DEUSS COSMOLOGICAL HALOS DATA

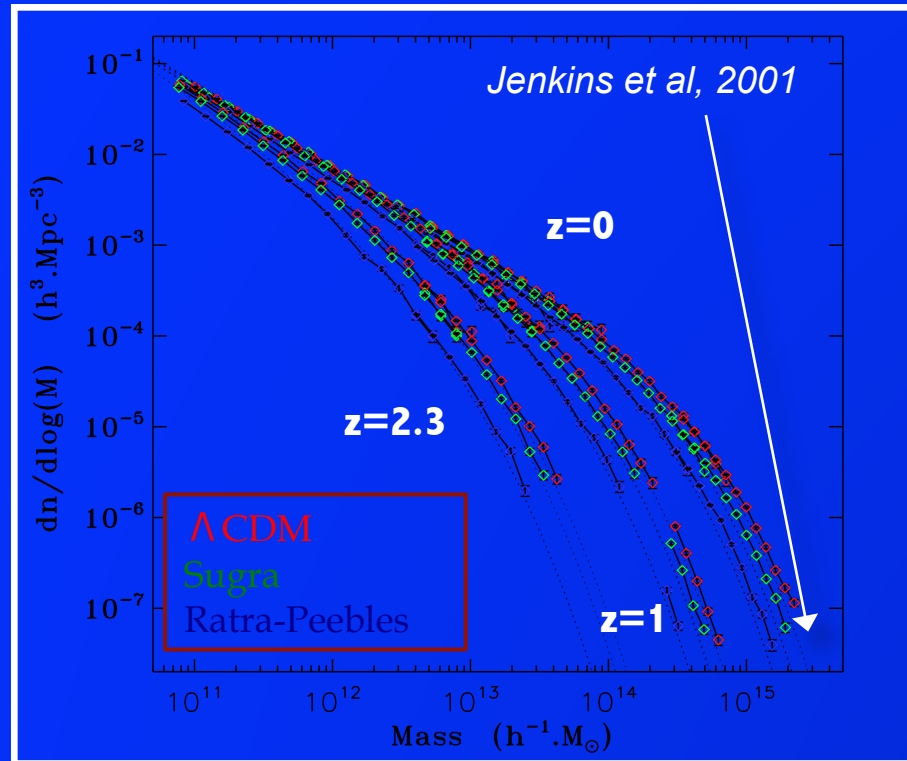
40 000 000 halos

Masses from $3 \cdot 10^{10}$ to $8 \cdot 10^{15}$ M_{sun}/h

Up to 500 000 halos per snapshot

Up to 3 000 000 particles per halo

EXAMPLE: MASS FUNCTION



Courtin et al . arxiv:1001.3425

- Mass function from $8 \cdot 10^{10} \text{ Msun/h}$ (300 part) to $3 \cdot 10^{15} \text{ Msun/h}$ (10% noise)
- Differences between cosmologies: help breaking degeneracies between DE models
- Differences with Jenkins et al, 2001 at high mass end
- DE dependant deviations from universal behavior!

LIGHTCONES

- **CONES**

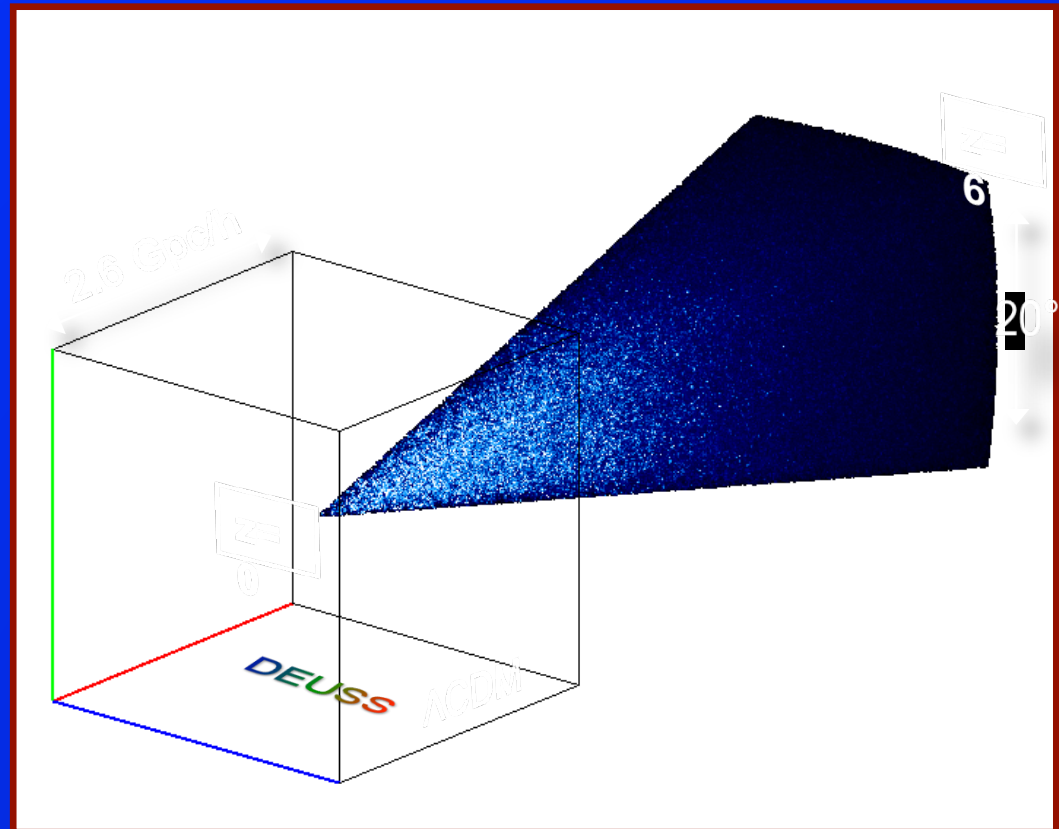
- Particles as we see them (not as they are at a given instant)
- Cone maker on the fly in RAMSES (Teyssier, Colombi, Guillet)
- Dump particles in light distant shell every coarse time step
- Postprocessing: **particles sorted per redshift + merged into one file**

- **What are the particles properties?**

- Cosmological redshift
- Positions and velocities

- **What could I do with it?**

- Any observation oriented study
- Weak lensing for instance

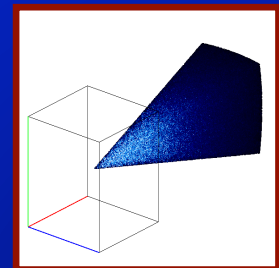
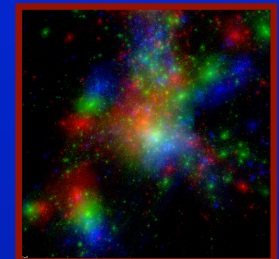
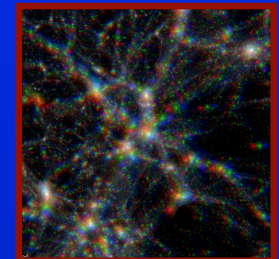


DEUSS LIGHTCONES

3 full sky lightcones (4π) up to $z=1$
6 narrow lightcones ($20^\circ \times 20^\circ$) up to $z=6$

DEUS Consortium

- **Dark Energy Universe Simulation Series (DEUSS):**
 - 3 dark energy cosmologies calibrated on CMB and SNIa
 - unprecedented simulation series with dynamical DE (spatial dynamics)
 - 28 To of raw data along the space filling curve
 - Post-processing: user friendly data
- **Fields**
 - data: cubic subvolumes (particles position, velocity, identity)
 - applications: power spectra (deviations from Smith), BAO, weak lensing...
- **Halos**
 - data: particles sorted halo per halo (particles position, velocity, identity)
 - applications: mass functions (deviations from Jenkins), cluster count, strong lensing, density profiles...
- **Lighcones**
 - data: particles sorted per redshift (particles redshift, position, velocity)
 - applications: observed quantities, weak lensing...
- **Diffusion**
 - DEUS Consortium website (ftp)
 - Dark Energy Universe Virtual Observatory (in progress)

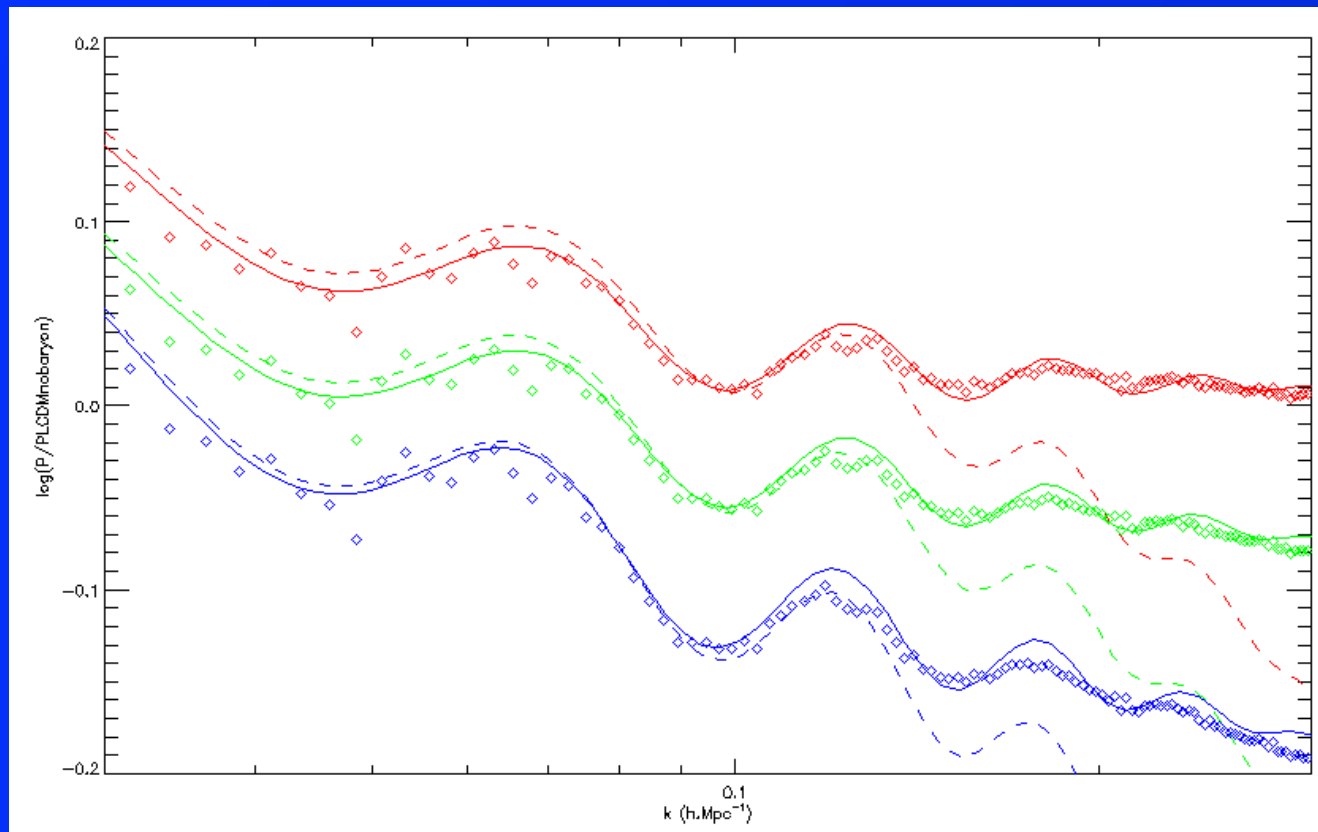


« Reconstruction »

Analyse de données (grands projets) et Simulation numérique:

Exemple de la mesure des BAO:

- paramètres cosmologiques, et équation d'état.
- la dynamique non-linéaire corrige la mesure des BAO.
- cette correction doit être spécifique à chaque modèle.



- Normalisé à la prédiction linéaire (tiret) et à la prédiction Smith (trait plein) et al sans baryon.

- Mise en évidence (grossière) des BAO.

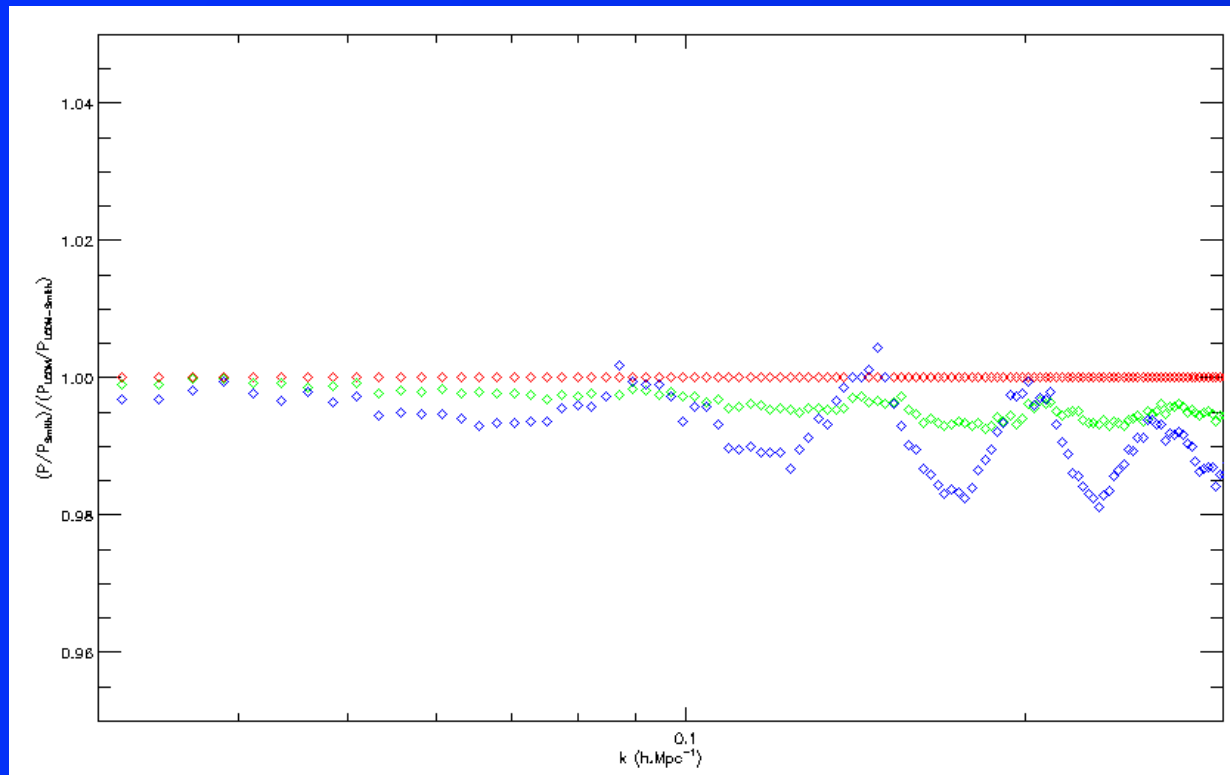
- Légers décalages des pics (amplitude et position)

« Reconstruction »

Analyse de données (grands projets) et Simulation numérique:

Exemple de la mesure des BAO:

- la correction non-linéaire est spécifique à chaque modèle.
- quid du modèle fiduciel et des régions de confiance dans un garphe w_0, w_1 ?
- précision sur ces paramètres et capacité à retrouver le modèle sous-jacent.
- analyse des BAO sur les halos dans un lightcone.
- Caractéristique géométrique du projet Big Boss.



EMPREINTE DE L'ÉNERGIE NOIRE SUR LA FORMATION DES STRUCTURES.

CONSORTIUM DEUS (DARK ENERGY UNIVERSE SIMULATION)

WWW.DEUS-CONSORTIUM.ORG

Je vous remercie de votre attention

1^{er} Février 2010
CPPM, Marseille
J.-M. ALIMI

V. Boucher, P.-S. Corasaniti, J. Courtin, A. Fuzfa, Y. Rasera,, ...
AIP Conf.Proc.861:858-866, 2006 **arXiv:astro-ph/0611284**,
M.N.R.A.S. 401:775,2010, arxiv:0903.5490,
arxiv:1001.3425